

ANYAGVIZSGÁLÓK LAPJA

MINŐSÉGBIZTOSÍTÁS • ÁLLAPOTELLENŐRZÉS

VÁLOGATÁS 2012 – JUBILEUMI SZÁM



Gillemot László

100 éve, 1912. október 7-én született.

Az ő tiszteletére a 2012. év legyen:

**A magyar műszaki anyagtudomány
és az anyagvizsgálat éve!**

Életének főbb állomásai

- 1935. Gépészmérnök a Műegyetemen
- 1941. Műszaki doktorátus: A hegesztés röntgenvizsgálata
- 1948-1969. A Fémipari Kutatóintézet alapító igazgatója
- 1949-1952. A Vasipari Kutatóintézet alapító igazgatója
- 1954-1957. A Műegyetem rektora
- 1945-1977. Tanszékvezető a Műegyetem
Mechanikai Technológiai Tanszékén
- 1949. Kossuth-díj
- 1957. Kossuth-díj
- 1971-1974. Az International Institute of Welding
alelnöke



A Gillemot-centenárium hírei: www.att.bme.hu

ANYAGVIZSGÁLOK LAPJA

Jegyzet

Szerkesztőség:

a kiadó, a Marovisz címén:
1211 Budapest, Varrógépgyár u. 8-10.
Telefon: (36-1) 278-0632;
Telefax: (36-1) 278-0633;
E-mail: info@anyagvizsgaloklapja.hu

Felelős szerkesztő:

dr. Gillemot László

A szerkesztőbizottság tagjai:

dr. Borbás Lajos
Csizmazia Ferencné dr.
Fodor Olivér
Eur. Ing. Fücsök Ferenc
Dr. Ginsztler János
Gregász Tibor
dr. Koczor Zoltán
dr. Pallósi József
Rózsavölgyi Zsolt
Szávai Szabolcs
dr. Tóth László
dr. Trampus Péter

Kiadja:

a Magyar Roncsolásmentes
Vizsgálati Szövetség

Felelős kiadó:

dr. Trampus Péter,
a Marovisz elnöke

Nyomda:

PRINT-HOUSE KFT
Felelős vezető: Fodor Imre

ISSN 1215-8410

A „Válogatás” rendszerint nem tematikus kiadvány és az év végén jelenik meg. Ebben az évben a Szerkesztő Bizottság eltér a hagyományoktól, amit Dr. Gillemot László professzor, akadémikus születésének 100. évfordulója (2012. október 7.) tesz indokolttá.

Gillemot László munkássága rendkívül széleskörű az anyagszerzet-tantól, a fém előállítási módszereken át, a fém alakítást és a hegesztést magába foglalva, a kutatás szervezésig, az oktatás fejlesztéséig sok mindenre kiterjed. Mindezekben a területeken kimagasló eredményeket ért el. Ez a rendkívüli teljesítmény elismeréseként került sor, kerül sor megemlékezésekre.

Gillemot László munkásságáról és a centenáriumi év eseményeiről a www.GILLEMOT.hu honlapon lehet bővebb információhoz jutni. A Budapesti Műszaki Egyetem Anyagtudomány és Technológia Tanszék kezdeményezéséhez számos szervezet (Magyar Tudományos Akadémia [MTA], Magyar Roncsolásmentes Vizsgálati Szövetség [MAROVISZ], Gépipari Tudományos Egyesület [GTE], Országos Magyar Bányászati és Kohászati Egyesület [OMBKE]) csatlakozott és tartott, tart megemlékezést a „Gillemot munkásságról”. Több hazai és határon túli konferencián és egyéb eseményen hangzik el egy-egy megemlékező előadás. A megemlékezések sorából kiemelkedik az MTA szakmai napja, ahol az ország vezető szakemberei tekintették át ennek a 100 évnek a legkiemelkedőbb eredményeit, és ebbe ágyazták be a Gillemot László érdemeit.

A 6. Anyagvizsgálat a Gyakorlatban [AGy] konferencia egy teljes szekcióban tárgyalta, hogy Gillemot professzor hogyan befolyásolta a hazai anyagvizsgálat fejlődését.

E két esemény anyagvizsgálattal kapcsolatos előadásainak írásos változatait tartalmazza a jelen „Válogatás”.

Gillemot László
felelős szerkesztő

TARTALOM

MÉRFÖLDKÖVEK

<i>Ginsztler János: Gillemot László akadémikusra (1912-1977) emlékezünk</i>	3
<i>Gyulai József: Gillemot László (1912–1977)</i>	9
<i>Becker István: Emlékek és anekdoták prof. Dr. Gillemot Lászlóról és tanszékéről</i>	11

ANYAGSZERKEZET-VIZSGÁLAT

<i>Gillemot Ferenc: Szerkezeti anyagok fejlesztése és vizsgálata fémfizikai alapokon</i>	13
--	----

MECHANIKAI VIZSGÁLATOK

<i>Tóth László: Az anyagvizsgálat fejlődése hazánkban az elmúlt évszázadban</i>	17
---	----

TÖRÉSMECHANIKA

<i>Tóth László: A törésmechanika modelljei és azok gyakorlati alkalmazásai</i>	27
<i>Czoboly Ernő, Havas István, Orbulov Imre Norbert: Törési vizsgálatok a BME Mechanikai Technológia Tanszéken</i>	43

RONCSOLÁSMENTES VIZSGÁLATTECHNIKA

<i>Trampus Péter: Roncsolásmentes vizsgálatok 100 éve</i>	46
---	----

RÖNTGEN VIZSGÁLATOK

<i>Becker István: Wilhelm Conrad Röntgentől dr. Gillemot Lászlóig</i>	51
<i>Balaskó Márton, Horváth László: Digitális röntgen vizsgálati eljárások</i>	53
<i>Czinege Imre, Kozma István: Az ipari komputer tomográfia vizsgálati lehetőségei</i>	58

Gillemot László akadémikusra (1912-1977) emlékezünk

Ginsztler János*

Gillemot László, Gillemot professzor úr egy fogalom volt, ma is az, és meggyőződésem, hogy 100 év múlva is az lesz. Emlékszem, néhány évtizeddel ezelőtt érettségi vizsgánkon a táblára az volt felírva nagybetűkkel, latinul hogy „nem az iskolának, hanem az életnek tanulunk”.

Azon gondolkoztam, hogy a középiskola, „védő” falai közül kilépve az egyetemen ki és hogy fog majd az ÉLETRE tanítani. A választ hamarosan megkaptam. Már egyetemi tanulmányaink elején az Anyagszerkezettan és anyagvizsgálat tantárgy kapcsán találkozhattunk Gillemot professzorral, fantasztikus, csodálatos egyéniségével.

Előadásai nem csupán a szakmai ismeretek átadására korlátozódtak, hanem ÉLETRE szóló tanácsokat adott át hallgatóinak, Megnyugodtam; ahol ilyen egyéniségek tanítanak minket, ott „csak” figyelni kell, tudomásul venni, hogy önállóan kell gondolkodni, s mivel „legjobb” megoldás nem létezik, az OPTIMÁLIS megoldásra kell törekedni egy-egy feladat megoldásánál.

Gillemot professzor úr nagyapja világhírű rózsakertész volt, édesapja Gillemot Ferenc (1875–1916) sokoldalú sportemberként vált ismertté. 1902–1904 között a magyar labdarúgó válogatott első hivatalos, sokoldalú és alaposan képzett edzője, szövetségi kapitánya volt. Gillemot professzor édesanyja Sugár Olga. Az 1. ábrán családja néhány tagja szerepel. A képen Gillemot László és Gillemot Katalin, a professzor úr nővére látható, akit mindig csak „kis húgomnak” nevezett.

Tanulmányait a Magyar Királyi József Műegyetem Gépészmérnöki Osztályán, valamint a Magyar Királyi Pázmány Péter Tudományegyetemen végezte, az utóbbit matematikát, fizikát és filozófiát tanult (2. ábra). A 3. ábrán Gillemot László 1931/32. tanévből származó indexe látható, gépészmérnöki oklevelét 1935-ben szerezte.

Néhány évvel később, 1941-ben szerezte meg műszaki doktori oklevelét „A hegesztés röntgenvizsgálata” témában (4. ábra). Munkahelyeit az 5–7. ábrán tüntettük fel. Egyetemi tisztségei a

8–9. ábrán láthatók. Ipari kapcsolatai és akadémiai tagságai a 10. és a 11. ábrán, kitüntetései a 12–15. ábrán láthatók. A 16. ábrán kutatásai és publikációi egy részét villantjuk fel.

Előadásai színesek, érdekfeszítők voltak. Sok hallgató még a népszerű Mészöly Sörözőben eltöltött ideje egy részéről is képes volt lemondani, nehogy elmulassza a következő Gillemot-előadást. Hallgatói rajongtak érte, és nyílt levélben álltak ki mellette a II. világháború utáni zavaros időben. Előadásai nem nélkülözték a fanyar humor: egyik elhíresült mondatát a 17. ábrán láthatjuk, ahol fiatal munkatársával, Szabadits Ödön adjunktussal együtt látható. A 18–21. ábra idézetei ugyancsak rendkívüli humoráról árulkodnak. Talán leghíresebb életbölcssége, humorba csomagolva így hangzik: „Gentleman az, aki tud szaxofonozni (is), de nem teszi.”

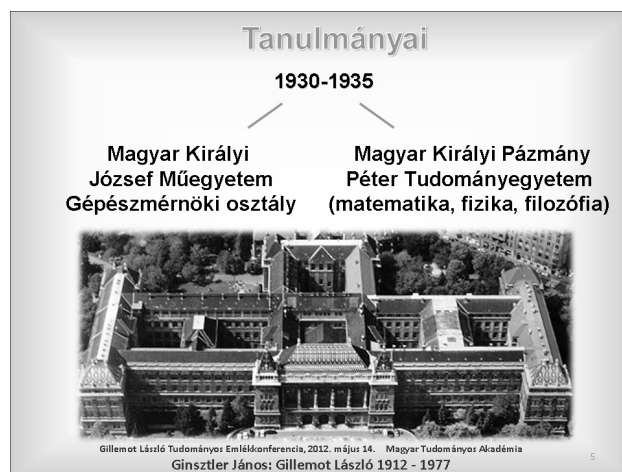
Munkássága és társadalmi tevékenysége – címszavakban – a 22–32. ábrán látható. A 25. ábrán egyik előadása közben látható. Szabadon adott elő, soha nem használt segédeszközt. Ami viszont nincs a képen, az az elegáns mozdulat, amikor a jobb kezével benyúl zakója bal felső belső zsebébe, egy kis papírt cetlit vesz elő, és arról ír fel néhány számadatot a táblára, majd visszatesszi a papírt a zsebébe. Felejthetetlen mozdulatok néhány szó kíséretében: „Látják uraim (és hölgyeim), hogy felesleges adatokkal nem érdemes terhelni az agyunkat”.

Sokan a XX. Század utolsó polihisztorának nevezték. Ezt illusztrálják a 33–38. ábrák. A 39. ábrán felesége, Éva asszony, és gyermekei, Kati, Ferenc és László látható szüleik társaságában. Gillemot professzor úr, ha élne, büszke lenne rájuk.

Halálát követően emlékérmek örökölték meg professzor úr arcképét (40. ábra), majd 2007-ben a BME Anyagtudomány és Technológia Tanszék előtt került sor a professzor úr szobrának avatására (41. ábra), ahol is Dévényi László, tanszékvezető emlékezett meg Gillemot professzor úrról.

A szerző ezúton fejezi ki köszönetét azoknak, akik adatokkal, információk gyűjtésével járultak hozzá ezen emlékelőadás összeállításához. Külön köszönet illeti Dobránszky János, tudományos főmunkatársat és Törzsök Péter, mérnök urat hozzájárulásukért.

* Dr. Ginsztler János akadémikus, egyetemi tanár BME (ginsztler@mti.bme.hu) 2012. május 14.-én a Gillemot László Tudományos Emlékonferencián elhangzott előadás írott változata



Tanulmányai

1935 – Gépészmérnöki oklevél




Az 1935. évi oklevél, h. 14. a tartott gépészmérnöki szigorlaton kitűnően teljesített.

Gillemot László leckekönyve (1931/32 tanév)

Gillemot László Tudományos Emlékonferencia, 2012. május 14. Magyar Tudományos Akadémia
Ginsztler János: Gillemot László 1912 - 1977

Tanulmányai

1941 – Műszaki doktori cím megszerzése




A műszaki doktori cím átvételekor

Gillemot László Tudományos Emlékonferencia, 2012. május 14. Magyar Tudományos Akadémia
Ginsztler János: Gillemot László 1912 - 1977

Munkahelyei



Standard 3A rádió

- Standard Villamossági Rt. (1935)
- 1935 ősztől a Műegyetem Mechanikai Technológiai Intézete
- Gyakornok, tanársegéd 1940-ig
- Adjunktus (1940-1944)
- Helyettes tanár (1944-1947)



Gillemot László Tudományos Emlékonferencia, 2012. május 14. Magyar Tudományos Akadémia
Ginsztler János: Gillemot László 1912 - 1977

Munkahelyei

Nyilvános rendkívüli egyetemi tanár (1947-1949)




Gillemot László Tudományos Emlékonferencia, 2012. május 14. Magyar Tudományos Akadémia
Ginsztler János: Gillemot László 1912 - 1977

Munkahelyei

1949-től nyilvános rendes egyetemi tanár (tanszékvezető) a Mechanikai Technológiai Tanszék élén



Gillemot László Tudományos Emlékonferencia, 2012. május 14. Magyar Tudományos Akadémia
Ginsztler János: Gillemot László 1912 - 1977

Egyetemi tisztségek

- Mérnöki Továbbképző Intézet elnöke (1954-1957)
- Rektor (1954-1957)
- Tudományos rektorhelyettes (1965-1967)



Rektorként a prágai Karoly Egyetemen

Gillemot László Tudományos Emlékonferencia, 2012. május 14. Magyar Tudományos Akadémia
Ginsztler János: Gillemot László 1912 - 1977

Egyetemi tisztségek

Gillemot László, rektor, javaslatot terjeszt az Egyetemi Tanács elé a tanfolyami rendszer átalakításáról és a később bevezetendő hegesztő szakmérnök képzésről. (1955. december 15.)



Az Anyagtudomány és Technológia Tanszék hegesztési laboratóriuma

Gillemot László Tudományos Emlékonferencia, 2012. május 14. Magyar Tudományos Akadémia
Ginsztler János: Gillemot László 1912 - 1977

Ipari kapcsolatai

- Nehézipari Központ osztályvezetője (1946-1948)
- Megalapította a Fémipari Kutató Intézetet, amelynek igazgatója volt (1948-1969)
- Ugyancsak igazgatója volt a Vasipari Kutató Intézetnek (1949-1952)



Gerő Ernővel, a Duna-hidak újjáépítésének felelősével

Gillemot László Tudományos Emlékonferencia, 2012. május 14. Magyar Tudományos Akadémia
Ginsztler János: Gillemot László 1912 - 1977

Akadémiai tagságok

1949-től a Magyar Tudományos Akadémia levelező tagja
1965-től a Magyar Tudományos Akadémia rendes tagja




1969-től a
Jugoszláv Tudományos és Művészeti Akadémia levelező tagja

Gillemot László Tudományos Emlékonferencia, 2012. május 14. Magyar Tudományos Akadémia
Ginsztler János: Gillemot László 1912 - 1977

Kitüntetései

Az első Kossuth-díj
A nagyméretű hegesztett acélszerkezetek építéséért (1949)



Gillemot László Tudományos Emlékonferencia, 2012. május 14. Magyar Tudományos Akadémia
Ginsztler János: Gillemot László 1912 - 1977

Kitüntetései

A második Kossuth díj
A fémtitán előállítási technológiájának kidolgozása (1957)



Gillemot László Tudományos Emlékonferencia, 2012. május 14. Magyar Tudományos Akadémia
Ginsztler János: Gillemot László 1912 - 1977

Kitüntetései

- Carnegie díj (1940)

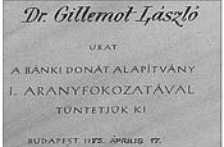
*Harmadszor nyerte el
A CARNEGIE-ALAPÍVÁNY DÍJÁT
a Műegyetem Misángyi-tanszéke*
Gillemot László egyetemi tanársegéd
kapta az 1940-es Carnegie-díjat

- Köztársasági Érdemérem ezüst fokozata (1949)
- Pattantyús Á. Géza Díj (1958)
- Az oktatásügy kiváló dolgozója (1965;1967)
- Francia Tudományos Akadémia Tudományos Kutatás Érdemrendjének parancsnoki fokozata (Párizs, 1966)

Gillemot László Tudományos Emlékonferencia, 2012. május 14. Magyar Tudományos Akadémia
Ginsztler János: Gillemot László 1912 - 1977

Kitüntetései

- Munka Érdemrend arany fokozata (1972)
- Bánki Donát emlékérem (1975)
- Budapesti Műszaki Egyetem Emlékérme (1975)

Gillemot László Tudományos Emlékonferencia, 2012. május 14. Magyar Tudományos Akadémia
Ginsztler János: Gillemot László 1912 - 1977

Publikációi, kutatásai

- Publikációi:
számos tudományos cikk,
konferencia előadás és
könyv fűződik a nevéhez




- Kutatásai:
Anyagszerkezetten, anyagvizsgálat, hegesztett kötések
röntgenvizsgálata, törésmechanika, képlékenyalakítás

Gillemot László Tudományos Emlékonferencia, 2012. május 14. Magyar Tudományos Akadémia
Ginsztler János: Gillemot László 1912 - 1977

Fanyar humora

„Ameddig tanszékünk oktatja a hegesztést, biztosan lesznek anyagvizsgálat témájú kutatási megbízásaink...”



Gillemot László Tudományos Emlékonferencia, 2012. május 14. Magyar Tudományos Akadémia
Ginsztler János: Gillemot László 1912 - 1977

Fanyar humora

- „Kedves ifjú kollégám,
jegyezze meg, hogyha
maga a korrózió elkerülése
érdekében rozsdamentes
acélból akarja gyártani a
távvezetékoszlopokat,
akkor azok még akkor is
fényesek lesznek, amikor
maga kijön a börtönből.”
- „A praxis azon hibák összessége, amelyeket az
ember élete során elkövetett.”



Gillemot László Tudományos Emlékonferencia, 2012. május 14. Magyar Tudományos Akadémia
Ginsztler János: Gillemot László 1912 - 1977

Fanyar humora

- „Uraim!
Nem takarékoskodni
kell, hanem többet
keresni, mint amit
elköltünk.”



- „Magyarországon két helyen található vasérc:
Rudabányán és Szarvaskőn.
Ez utóbbi egyben a vas
minőségét is jelzi.”



Gillemot László Tudományos Emlékkonferencia, 2012. május 14. Magyar Tudományos Akadémia
Ginsztler János: Gillemot László 1912 - 1977

22

Fanyar humora

Gillemot professzor úr irodájában ülünk, három új
egyetemi gyakornok a tanszéken, valamint a
professzor úr.

Belép a tanszéki adminisztrátor és hoz öt kávét, majd
elnézést kér:

- Elnézést, hiszen csak öten vannak!
Gillemot:
- Nem tesz semmit, ez velem is előfordul. Három fölött
én is csak papíron számolok.

Gillemot László Tudományos Emlékkonferencia, 2012. május 14. Magyar Tudományos Akadémia
Ginsztler János: Gillemot László 1912 - 1977

23

Fanyar humora

Gillemot profot egyik munkatársa meghívja a
kandidátusi védésre.

Gillemot:

- A legtöbb, amit tehettek érted, öregem, az, hogy nem
megyek el.

Levezet, levezet, a hallgatóság hibát vél felfedezni,
és morogni kezd. A kétszeres Kossuth-díjas
egyetemi tanár, a Francia Akadémiai díj parancsnoki
fokozatának tulajdonosa, akadémikus, átfutja a
levezetést, majd:

- Ha megengedik, ragaszkodom hozzá!

Gillemot László Tudományos Emlékkonferencia, 2012. május 14. Magyar Tudományos Akadémia
Ginsztler János: Gillemot László 1912 - 1977

24

Gillemot László munkássága címszavakban

Hegesztés:

- Kossuth híd
hegesztése
(Kossuth díj, 1949)
- CO₂ automata
hegesztés hazai
elterjesztése
- Nagyszilárdságú
hegeszthető
acélok fejlesztése
- Szabadalmak
- Egyetemi tankönyvek



A Kossuth-híd hegesztése

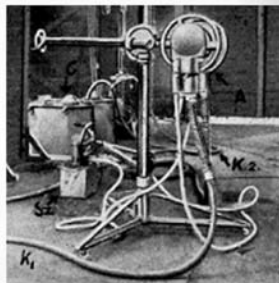
Gillemot László Tudományos Emlékkonferencia, 2012. május 14. Magyar Tudományos Akadémia
Ginsztler János: Gillemot László 1912 - 1977

25

Gillemot László munkássága címszavakban

Anyagvizsgálat:

- Röntgenvizsgálatok
hazai bevezetése
(doktori cím, 1941)
- Vizsgálatok fizikai
hátterének fejlesztése
- Fajlagos törési
munka
(francia akadémiai díj)
- Egyetemi tankönyvek



Az első hazai röntgenvizsgáló berendezés

Gillemot László Tudományos Emlékkonferencia, 2012. május 14. Magyar Tudományos Akadémia
Ginsztler János: Gillemot László 1912 - 1977

27

Gillemot László munkássága címszavakban

Képlékenyalakítás:

- Nagysebességű
képlékeny-alakítás
- Erőegyensúlyon alapuló
folyamatleírások
- Egyetemi jegyzetek



A nagysebességű ütőmű, a
„Dinapakk”

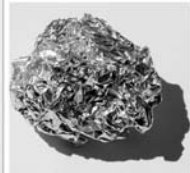
Gillemot László Tudományos Emlékkonferencia, 2012. május 14. Magyar Tudományos Akadémia
Ginsztler János: Gillemot László 1912 - 1977

28

Gillemot László munkássága címszavakban

Fémkohászat:

- A fémtitan fülüzemi technológiája (Kossuth-díj, 1957)
- Alumíniumkutatások irányítása (1948-1969)
- Egyetemi tankönyv



Gillemot László Tudományos Emlékkonferencia, 2012. május 14. Magyar Tudományos Akadémia
Ginsztler János: Gillemot László 1912 - 1977

29

Gillemot László munkássága címszavakban

Intézmények
alapítása:

- Fémkut
igazgató 1948-1969
- Vaskut
igazgató 1950-1952



Gillemot László Tudományos Emlékkonferencia, 2012. május 14. Magyar Tudományos Akadémia
Ginsztler János: Gillemot László 1912 - 1977

30

Gillemot László munkássága címszavakban

Oktatás:



Gillemot László Tudományos Emlékonferencia, 2012. május 14. Magyar Tudományos Akadémia
Ginsztler János: Gillemot László 1912 - 1977

- A teljes gépészmérnöki anyagtudományi és anyagtudományi oktatás megújítása
- Hegesztő szakmérnöki képzés
- Képlékenyalakító szakmérnöki képzés
- Anyagvizsgáló szakmérnöki képzés
- Mérnöki Továbbképző Intézet
- Idegen nyelvű TDK elindítása

Gillemot László munkássága címszavakban

Az MTA-kutatócsoport 1961-ben indult, Czoboly Ernő és Havas István alapító tag



Czoboly Ernő

Gillemot László Tudományos Emlékonferencia, 2012. május 14. Magyar Tudományos Akadémia
Ginsztler János: Gillemot László 1912 - 1977



Havas István

Gillemot László munkássága címszavakban

1971-74 az IIV alelnöke



Gillemot László Tudományos Emlékonferencia, 2012. május 14. Magyar Tudományos Akadémia
Ginsztler János: Gillemot László 1912 - 1977

Gillemot László munkássága címszavakban

Nevéhez fűződik:

- 156 tudományos publikáció
- 24 könyv illetve könyvrészlet
- 22 szabadalom



Gillemot László Tudományos Emlékonferencia, 2012. május 14. Magyar Tudományos Akadémia
Ginsztler János: Gillemot László 1912 - 1977



Társadalmi tevékenységek

Közreműködött a következő szervezetekben:

- Tudományos és Felsőoktatási Tanács
- Magyar Mérnökök és Technikusok Szabad Szakszervezete

Tagja volt a következő testületeknek:

- Magyar Anyagvizsgálók Egyesülete
- Magyar Mérnök- és Építészegyesület
- Országos Magyar Bányászati és Kohászati Egyesület
- Műszaki és Természettudományi Egyesületek Szövetsége
- Országos Béketanács
- Egyetemi Tanács
- Kari Tanács
- Egyetemi Tudományos Bizottság
- Vasipari Kutató Intézet Tudományos Tanácsa

Gillemot László Tudományos Emlékonferencia, 2012. május 14. Magyar Tudományos Akadémia
Ginsztler János: Gillemot László 1912 - 1977

Társadalmi tevékenységek

Elnöke, vezetője, vezetőségi tagja volt:

- Hazafia Népfrent Nagybudaepeti Bizottság elnökségi tagja
- Mérnöki Továbbképző Intézet
- MTA Kohászati Főbizottsága
- MTA Gépészeti Bizottsága
- MTA Gépészeti és Kohászati Tudományok Szakcsoportja
- MTA Elméleti Technológiai Bizottsága
- Gépipari Tudományos Egyesület Tudományos Bizottsága
- BME Gépészeti Tudományos Tanácsa
- Országos Műszaki Fejlesztési Bizottság

Gillemot László Tudományos Emlékonferencia, 2012. május 14. Magyar Tudományos Akadémia
Ginsztler János: Gillemot László 1912 - 1977

„A XX. század utolsó magyar polihisztora”

Sport:

- Vitorlázás
- Evezés
- Futás
- Ökölvívás
- Tenisz
- Labdarúgás



Pattantyús-Ábrahám Gézával egy focimeccs előtt

Gillemot László Tudományos Emlékonferencia, 2012. május 14. Magyar Tudományos Akadémia
Ginsztler János: Gillemot László 1912 - 1977

„A XX. század utolsó magyar polihisztora”

Sport:

A „Gillemot tanszék” és a „Pattantyús tanszék” meccse



Csapatkép, háttérben az „MG” épület (1950)

Gillemot László Tudományos Emlékonferencia, 2012. május 14. Magyar Tudományos Akadémia
Ginsztler János: Gillemot László 1912 - 1977

„A XX. század utolsó magyar polihisztora”

Hobbi:

- Zenehallgatás (olyan ritka lemezei is voltak, amelyeket a Magyar Rádió is kölcsönkért)
- Olvasás (szinte hihetetlen sebességgel)
- Történelem
- Ókori kultúra
- Sakk
- Bridzs
- Vadászat („puskával sokkal élvezetesebb sétálni”)



Vadászati tagsági könyv

Gillemot László Tudományos Emlékkonferencia, 2012. május 14. Magyar Tudományos Akadémia
Ginsztler János: Gillemot László 1912 - 1977

42

„A XX. század utolsó magyar polihisztora”

Főzés szeretete:

- Szabad tűzön
- Nemzetközi konyha („ősi” magyar ételek, indiai, francia konyha)
- Fánk

Tojáskrémleves:

2 tojás sárgáját 2 deka vajjal 1/3 kanál liszttel simára keverjük. Hozzáadunk 1 kanál édes tejfölt (esetleg tejet) és csontlével feleeresztve felforraljuk

Gillemot László Tudományos Emlékkonferencia, 2012. május 14. Magyar Tudományos Akadémia
Ginsztler János: Gillemot László 1912 - 1977

43

„A XX. század utolsó magyar polihisztora”

Fantasztikus baráti kör:

Kémikusok, Műszakiak, Orvosok, Művészek



Gillemot László Tudományos Emlékkonferencia, 2012. május 14. Magyar Tudományos Akadémia
Ginsztler János: Gillemot László 1912 - 1977

44

„A XX. század utolsó magyar polihisztora”

Állatszeret:

- Kutya
- Macska



Gillemot László Tudományos Emlékkonferencia, 2012. május 14. Magyar Tudományos Akadémia
Ginsztler János: Gillemot László 1912 - 1977

45

Magánélete

Felesége:

Éva



Gyermekei:

- Katalin
- Ferenc
- László

Gillemot László Tudományos Emlékkonferencia, 2012. május 14. Magyar Tudományos Akadémia
Ginsztler János: Gillemot László 1912 - 1977

46

Élete után

Gillemot-emlékérem
BME Anyagtudomány és
Technológia Tanszék, 2007



Gillemot-emlékérem
Gépipari Tudományos
Egyesület, 1987



Gillemot László Tudományos Emlékkonferencia, 2012. május 14. Magyar Tudományos Akadémia
Ginsztler János: Gillemot László 1912 - 1977

47

Élete után

Szoboravatás:

Gillemot professzor szobrának felavatása a Budapesti Műszaki Egyetem – Anyagtudomány és Technológia Tanszéke előtt (2007)



Gillemot László Tudományos Emlékkonferencia, 2012. május 14. Magyar Tudományos Akadémia
Ginsztler János: Gillemot László 1912 - 1977

48

Gillemot László (1912–1977)

Nagy és – bevallom – váratlan megtiszteltetés, hogy én nyithatom meg a **6. Anyagvizsgálat a Gyakorlatban Szemináriumot**, amely egyben egy kimagasló esemény centenáriuma is. Az idén lenne százéves a hazai mérnök-gárda egyik legkiemelkedőbb személyisége, sok-sok generáció tanára, sőt, generációknak szakmailag kiváló, etikailag kiemelkedő mérnökké nevelője. Lehetséges és nagyszerű lenne, ha most virággal kereshetnők fel a családjá körében, hogy még további éveket kívánjunk neki és megkérdeznők, mit szól ahhoz a fejlődéshez, amely szakmának hazai indításában kulcsszerepe volt. Pláne, ha mint Németországban az ilyen alkalmakkor, az ünnepelteket személyesen köszöntő köztársaság elnök társaságában tehetnők mindezt... Ehelyett a nagyon is korai elszólyosítása felett kell szomorkodnunk, ami „megemlékezésé” változtatja ezt az ünnepet.

Jómagam, fiatalon – más város, más egyetemének más karára járva – nem ismerhettem, nem hallgathattam *Gillemot* professzort, de a későbbi, apostata fizikusból „mérnökivé” váló életében – az ő tanítványa-kollégáim, az ő tanítványa-barátaim elbeszéléseiből kirajzolódó képből – ugyanazzal az erővel állt elém példaképül, mint azok a nagyszerű professzorok, akik engem oktattak, sőt neveltek és később vezetőim is voltak, akikről én szoktam nagyszerű történeteket továbbadni. Így azután *Gillemot Lászlóról* hasonló képem alakult ki, mint a fizikus *Budó Ágostonról*, a matematikus *Szőkefalvi-Nagy Béláról*. Még *Simonyi Károly*éhoz is hasonló módon épült fel bennem a képe, akivel közel is hozott a későbbi jó sorom. Felruháztam tehát magamban *Gillemot Lászlót* is mindazokkal a jó tulajdonságokkal, amelyek az ember életében a meghatározó kapcsolatokat jelentő személyek feltétlenül rendelkeznek. Megismertem fiait, akikkel sokban párhuzamos volt mind a szakmai, mind a kollegiális életünk, akiket nagyra becsülök és tisztetek. A *Gillemot*-legendák belém is belém ivódtak. Különösképpen azt követően, hogy 1993 után a Bay Zoltán Anyagtudományi és Technológiai Intézetben tematikailag is és a munkatársak révén is a mérnöki anyagtudománynak a *Gillemot* által indított és művelt irányába fejlődtem, tanultam.

Az én tanárainkkal az analógia talán még tovább is megy: az én professzoraim is a *Gillemot*-korosztály tagjai voltak, akik fiatalon, de teljesen megérdemelten léptek a háború által megtizedelt értelmiségünk helyébe, akik a harmincas éveikben lehettek az Akadémia tagjai és folytatták azt a szakmailag tökéletes, erkölcsileg pedig követendő munkát, amelyet az egyetemi tanárság, és a Magyar Tudományos Akadémia tagsága fémjelzett. Akik az induláskor még egy szabadnak remélt országban kezdték a pályájukat, ami azután kompromisszumkeresésekbe torkollott, de amelynél ezek a kiválóságok, a nehezen ideologizálható témáknak is köszönhetően megtalálták az egyetlen lehetőséget: a támadhatatlanul tökéletes szakmai munkájukat tartották pajzsul a megromlott világ felé.

Érdekes lenne eltűnődni, hogy a világegések táján született tehetségek, ha a következő világegést is át tudták élni, miként nevelődtek olyan életigenlő meggyőződésűvé és ambíciózussá, hogy megfelelő tudást gyűjtsenek be. És, ha az azt követő diktatúra sem talált fogást rajtuk, hosszú időn át alkothattak, tehették a jót, tanítottak, neveltek, de, sajnos, sokan korán, fiatalon távoztak...

Kaptam sok anyagot, amelyek a felkészülést segítették. Műszaki

Dr. Gyulai József akadémikusnak a 6. AGY szemináriumon elhangzott előadásának írásos változata.

nagyjaink 6. kötetébe írt *Konkoly Tibor* egy nagyszerűen tényszerű és részletes anyagot, de kaptam egy hálás tanítványa, családom barátja, *Láng Róbertnek* az egyik évfordulóra írt visszaemlékezéséből is, amelyek megerősítették mindazt, amit az előző percekben elmondtam.

Tisztelt Megemlékezők! Ezekből az anyagokból kirajzolódik az a kép, amelyet teljességgel modernnek láthatunk. Az előadásaira való tökéletes felkészülése és kiváló előadói tehetsége okán „a tananyag nagyobb részét kellő odafigyeléssel már az előadásain meg lehetett jegyezni”. Vagy: „fontosnak tartotta a műszaki gondolkodásra, a tudományos kutató munka iránti fogékonyságra, a kontrollra és önkontrollra való nevelést” – olvashatjuk. Vagy: „többször kifejtette, hogy a mérnök nem fejezi be tanulmányait az államvizsgák letételével. Egy életen át alkalmasnak kell lennie szakmájának művelésére, önálló feladatok megoldására, alkotó módszerek kifejlesztésére, kísérletek végzésére, járatlan utakon haladni előre. Helyeselte, hogy a mérnökök néhány évig tanítással is foglalkozzanak, mert valódi mérnöki műveltség és annak gyarapítása az ismeretek újrafogalmazása nélkül nehéz. És ha mód van rá, a saját munkánkkal kapcsolatos tapasztalatok, eredmények időszaksos publikálására is feltétlenül szükség van.”

Felvetődik a kérdés: hogyan is indult ez a karrier? A kezdetekről így vall maga *Gillemot László*: „Eredetileg matematikus szerettem volna lenni és részt is vettem – sajnos, már nagyon régen – a középiskolai tanulmányi versenyen, ahol második lettem. Nagyon büszke vagyok arra, hogy aki megelőzött és első helyen végzett, a sajnos időközben elhunyt *Hajós György*, hazánk nagy matematikusa volt. Mögötte másodiknak lenni határozottan nagy dicsőség volt számomra. A későbbiekben viszont gépészmérnöki pályára léptem.”

Mindez 1930-ban történt. A Budapesti Műszaki Egyetem jogelődjének, az akkori József Műegyetemnek a Gépészmérnöki Karára iratkozott be. Egyetemista korában néhány hónapig szerelőként dolgozott a Magyar Siemens Schuckert Műveknél. Emellett négy féléven keresztül a, Pázmány Péter Tudományegyetem hallgatója is volt, ahol matematikát, fizikát és filozófiát is tanult. Itt hallgatott előadásokat a röntgensugárzásról és ez befolyásolta későbbi pályáját: Magyarországon *Gillemot László* lett a műszaki röntgenvizsgálatok meghonosítója.

1941-ben műszaki doktorrá avatták, 1940–1944-ig adjunktusként működött az egyetemen, 1944-ben megbízták helyettes tanári minőségben a tanszék vezetésével. 1945–49 között rendkívüli, 1949-től nyilvános rendes, illetve tanszékvezető egyetemi tanár volt. 1954–1957-ig rektori 1965–67-ig tudományos rektorhelyettesi tiszteletet töltött be. A Mechanikai Technológia Tanszék és a Villamosipari Anyagtechnológia Tanszék összevonásával létrehozott Mechanikai Technológia és Anyagszerkezet-tani Intézet igazgatójává nevezték ki. Itt dolgozott haláláig. Műszaki egyetemi működése során több mint negyven éven át oktatta. Nem csupán tananyagot tanít. hanem egy gondolkodásmódot kell átadni a diáknak.

Nagyon sok technikai alkotásban működött közre, mint szakértő. illetve tanácsadó. Részt vett a Mátravidéki Erőmű, Kelenföldi Erőmű, a Kossuth híd, a Szabadság híd, a, Lánchíd, a szolnoki Tisza híd, a Krasznai híd újjáépítésében. E tevékenységét mindig tudományos kutatással kapcsolta össze. A hegesztett hidak vizsgálata körében végzett munkája alapján nyilvánították egyetemi magántanárnak.

Tudományos működésének területe az anyagszerkezet-tan és azok a

technológiák, amelyek az anyag szerkezetét befolyásolják. Számos tanulmánya, értekezése jelent meg a vas- és fémkohászat, az anyagvizsgálat, a hegesztés, a képlékeny alakítás technológiája tárgykörökben. A munkája elismerésül a Magyar Tudományos Akadémiának már 37 éves korában levelező tagjává, 1965-ben pedig rendes tagjává választották.

Konkoly Tibor anyagából tudom, hogy közvetlenül a halála előtt, de azt követően a Gépgyártás-technológiában megjelent cikke ma is rendkívül tanulságos.

Egy-egy idézet:

„A technológiai kutatások és az alaptudományok között igen fontos összefüggések állnak fenn, mert az alaptudományok segítik a technológiai fejlődést, de csak akkor, ha az alaptudományi kutatás és a technológia között helyes arányok vannak.”

„Országos méretekben a technológiának nagyobb szerepet kell kapnia. A gyártástechnológia fejlesztése érdekében további hatékony lépésekre van szükség. Ezek a lépések egyáltalán nem a kutatólétszám növelését jelentik, hanem a kutatási kapacitások ésszerűbb kihasználását és a jelenleginél feltétlenül jobb koordinálását.” Itt, persze, megjegyezhetjük, hogy a magyar kutatói létszám jelentősen elmarad az európai átlagtól...

„Alapvető fontosságú” a technológiához illeszkedő, ahhoz szükséges gyártóeszköz kifejlesztése is – írja. A hazai piac méretei okán azonban ennek a feladatnak sokféle szempontot kell kielégítenie. Ami a licencvásárlástól az önálló kifejlesztésig terjed.

Pontosan látta az eufemisztikusan „szinttartó”-nak, „reprodukciós”-nak nevezett kutatás jelentőségét is de, szerinte, ezeknek csak akkor van értelme, ha gyorsan terméket eredményeznek. A ma feasibility-nek, megvalósíthatóságnak nevezett fogalomról is írt, amelynek a kockázatokról is szólnia kell. Emellett, a megvalósíthatóság minden feltételének az előkészítéskor fázisában ki kell derülnie – elsősorban a finanszírozó számára.

„A szerkesztés, a technológia és az anyagmegválasztás olyan szerves egységet képez, amely nélkül technológiai fejlesztést megvalósítani nem lehet.”

Számos szabadalmának, szakirodalmi munkásságának listázására szabad legyen Konkoly Tibor munkájára hivatkoznom.

A nagyobb szakmai területeinek a felsorolásától – követve Konkoly Tibor rendszerező munkáját – azonban nem tekinthetek el:

- A hegesztés röntgenvizsgálata – a módszer hazai bevezetése és indító széleskörű alkalmazása az ő érdeme,
- a magyar bauxit feldolgozásának új útjai, elemezte a bauxitok alkalmasságát, a drága magyar áram hatását, stb.,
- fémítán előállítása bauxitból, A titán fém „karrierje” már akkoriban elkezdődött, így a feladat fontossága nem kétséges,
- a gömbgrafitos öntöttvas,
- a törési munka,
- az általa tervezett pneumatikus nagysebességű ütőmű, arra is alkalmas volt, hogy a sebességnek milyen hatása van az anyagok tulajdonságára a folyamat közben és termékként,
- két intézet megalapítása,
- és, Tisztelt Olvasó, ne csak tréfának vegye: a teljes ember életét élő tudós munkái közül kiemelném a saját kézzel írt recept gyűjteményét, melyek között a hazai konyha ize éppúgy megtalálható, mint a nemzetközies (pl. francia és indiai konyha).

Hosszan idézhetném az egyetemei tanári hitvallását, amely nem csak maig érvényes, modern, de teljes is... A világban alkalmazott technológiák állandóan változnak, de az alap kutatás törvényei változatlanok – emiatt kell minden mérnöki tevékenységet arra alapozva oktatni. Erre alapozva beszél a harminc év múlva várható helyzetről, eredményekről.

„Azt szoktam mondani” írja, „hogy a tudós szó az én fiatal koromban jelző volt, most pedig foglalkozássá kezd válni” – hogy ez baj-e, vagy inkább terminológiai kérdés, arra hadd idézzem Pungor Ernő általi pontositást, megfogalmazást, miszerint a „kutató” a művének lezáródása, teljessé válása, azaz a halálát követően válhat „tudóssá”.

A kép teljességéhez hozzátartozik a mély humora is – szemelvények a „Vicinális Dugóhúzóból” és a „Ballagóba írt megjegyzéseinek példája:

„Aki egy mondat helyett kettőt, vagy tízet ír, az egyéb aljasságokra is képes.”

„Gentleman az, aki tud szaxofonozni, de nem teszi”

„A diffúziót parciális differenciálegyenlettel lehet felírni, de mivel némi népszerűsége töreksem, nem írom fel.”

„A praxis azon hibák összessége, amelyeket az ember élete során elkövet.”

Láng Róbert barátom is idézi sok, kedves és mérnökien plasztikus mondását:

„A gótikus stílus azért csúcsíves, mert kőből, megfelelő szilárdságú és magasságú templomot csak így lehetett építeni.”

„A képlékeny alakítás tudományát nem lehetne művelni szilárdtestfizika, anyagszerkezettan, tehát más tudományok ismerete nélkül.” – írja a forgácsolással összehasonlításban.

Nem volt híve az alap kutatás-alkalmazott kutatás felosztásának, inkább kölcsönhatásának. James Watt, egy gyakorló mérnök találta fel a gőzgépet és ez ösztönözte a kutatókat, hogy hőtannal, termodinamikával foglalkozzanak. Amelynek eredményeit ismét az alkalmazott kutatás használta fel.

Szilárd meggyőződése volt, írja Láng Róbert, hogy a műanyagok a jövő fontos alapanyagai lesznek. Sokfelét fognak kifejleszteni, amelyek az acél, réz, alumínium, gumi, fa és más anyagok helyettesítésére szolgálnak majd. Új anyagok új konstrukciókat igényelnek, amelyeket ti fogtok kifejleszteni és a gyártásban alkalmazni kedves barátaim, mondta.

Ismét a kedves humoráról tanúskodik a következő története: „Képzeliünk el egy kies tájat, ragyogó napsütés, havas hegycsúcsok, fenyőerdők, a hegy lábánál kis falu, patakkal, híddal és a hídon éppen átsétál egy gyönyörű, fiatal lány. A látvány műszaki szempontból egy kéttámaszú tartó, hosszirányban mozgó, ötven kilopondos terheléssel. De nagy hibát követnénk el, ha a műszaki észjárás mellett nem vennénk észre és nem élveznénk az élet szépségeit.”

Íme egy magyar „lakatosmester” – ahogy önmagáról tréfálkozott – élettörténetének vázlata, ahogy én megismerhettem.

Vajha, sok ilyen mesterünk születnék és dolgozna – idehaza...

Emlékek és anekdoták prof. Dr. Gillemot Lászlóról és tanszékéről

Becker István

Emlékek Gillemotról

A fáma szerint, még a II. világháború előtt a Magyar Királyi Honvédség felkérte a Mechanikai Technológiai Tanszéket egy honvédségi objektum röntgenvizsgálatára. *Misángyi* professzor a doktori disszertációját már befejező fiatal *Gillemot László* adjunktust bízta meg a feladat elvégzésével.

A helyszíni vizsgálatok meglehetősen piszkos munkát jelentettek, ezért csak munkás ruhában lehetett végezni. (Akkoriban nem volt megszokott, hogy egy egyetemi tanársegéd, adjunktus munkás ruhában dolgozzon.) Munka közben megjelent a munkát megrendelő ezredes. Oda megy a munkaruhás *Gillemothoz*, azt gondolva, hogy ő a segédmunkás, megszólítja: „mond fiam, hol van dr. *Gillemot László* adjunktus úr?” *Gillemot* válasza: „itt van a közelben, de mire kíváncsi az ezredes úr?” „Ó semmi, semmi, csak szerettem volna megismerni a röntgenvizsgálatot.” A munkaruhás *Gillemot*, „segédmunkás” a tőle megszokott precizitással elmondja az ezredes úrnak a röntgenvizsgálatok csínját-bínját. Az ezredes úr érdeklődéssel és csodálattal hallgatta a „segédmunkás” ismertetőjét, majd csak ennyit mondott: „hogya te milyen értelmes vagy fiam!”

Gillemot egyéniségéhez hozzá tartozott az abszolút pontosság, mind a munkában, mind pedig a programok időpontjait illetően. Előadásait percre pontosan kezdte, de ami más előadónál gondot szokott okozni, előadásait pontosan fejezte be, amit a hallgatóság mindig honorált.

Tőle származik az a mondás, hogy a munkaidő nem 8 óra kezdődik, hanem 7 óra 59 perc és 60 másodperckor.

Rektorrá választása után az első tanácsülésen a kitűzött időben alig néhány professzor volt jelen, megszokva az „akadémiai negyedórás” régi tradícióját. *Gillemot*, mint újonnan választott fiatal rektor, a kitűzött időpontban felállt és a jelenlévők megrökönyödésére megnyitotta a rektori tanácsulást. Beszédét, csak „idő-húzó” jelentéktelen gondolatokkal kezdte. Amikor nyílt az ajtó és belépett az első „későn jövő”, *Gillemot* abba hagyta a mondatot, az ajtóhoz sietett és megkülönböztetett udvariassággal kért bocsánatot az érkezőtől, amiért távollétében volt kénytelen az ülést elkezdni. Ugyanezt tette második, harmadik „későn érkező” professzorral. A jelenlévők akkor már mosolyogtak és rögtön látták *Gillemot* udvarias nevelő akcióját. A legközelebbi rektori tanácsülés percre pontosan kezdődött, anélkül, hogy bárkinek szólt volna a pontos kezdésről.

Az ötvenes években *Gillemot*nak még volt ideje a tanszék fiatal munkatársaival foglalkozni, mind szakmai, mind pedagógiai, sőt emberi magatartás terén. Az előadásokat nem volt szabad olvasni, legfeljebb a vázlatba beletekinteni. Az előadás élményszerűnek kell lennie. Az előadónak mindig a hallgatóság szemébe kell néznie, hogy a hallgatók érezzék, hogy a szavak nekik szólnak. Fontosnak tartotta a beszéd dinamikáját. Jelentős mondanivaló előtt lehalkítani, lelassítani a beszédet, majd a lényeg kellő hangerővel, hangsúlyozottan kerüljön előadásra. Egy-egy nehezebb részlet után, könnyítésként egy-egy élmény elmondása, vagy akár egy vicc is következhetett.

Gillemot matematikai felkészültsége kiemelkedett a gépész és kohász kollegáinak matematikai ismeretéhez képest, mert ő párhuzamosan a Műegyetemmel a Pázmány Péter Tudományegyetemen matematikát is hallgatott. A matematikai szemlélet óriási előnyt jelentett számára az élet minden területén. Differenciál-egyenletek megoldása még a táblánál improvizálva sem okozott neki problémát. Matematikai mutatónyait mindenki bámulta, tisztelte, sőt irigyelte.

Gillemot jól tudott angolul és németül. Saját bevallása szerint a német nyelvben csak a „der-die-das”-szal nem jött ki. „Ha németül kell

előadást tartanom, akkor megiszom előtte két konyakot, mert akkor már nem zavar engem a „der-die-das”.

Nagyon sok előadást tartott külföldön. Számos nemzetközi szervezetben viselt magas rangot. Külföldön is nagyon népszerű volt. Népszerűségét nem csak nyelvtudásának, hanem kitűnő társalgási készségének és vonzó egyéniségének köszönhette.

Az ötvenes évek elején a Műegyetem pártbizottsága levélben elmarasztalta a tanszéket, mert egyetlen párttag sem volt a tanszéken. Ez igaz volt, de nem azért, mert *Gillemot*nak kifogása lett volna bárki ellen. (*Rákosi Máttyás* unokaöccse *Bíró* professzor a tanszék meghívott előadója volt.) A pártbizottság levelének felolvasása után közölte a tanszék dolgozóival: „engem nem érdekel az emberek bőrének a színe, se a vallása, se a pártállása, csak az embersége és a teljesítménye.”

Egy anyagvizsgálati probléma megoldására kérték fel a profot. Megismerve a problémát befolyásoló tényezőket *Gillemot* közölte diagnózisát. A jelenlévők hálásak voltak a kedvező megoldásért. Búcsúzáskor „vizontlításra” köszöntek. „Csak ezt ne mondták volna”, mondta *Gillemot*, „ha engem vizontlítanak, akkor az legtöbbször valamilyen bajjal van kapcsolatban”.

Gillemot nagyon erős dohányos volt. 1965 nyarán Párizsban volt az IIW évi közgyűlése. A repülőgépen vett magának egy karton cigarettát. Ezzel a kezében lépett ki a repülőgépből. Akkor még nem tudta, hogy ez volt az ő összes poggyásza, mert a kofferjeit nem rakták ki az amszterdami átszállásnál, azok tovább repültek Londonba, majd vissza Budapestre. Se fogkefe, se pizsama, se ing, se se, ... Neki, mint a „Governing Council” tagjának szerepelnie kellett. Nehezen találtunk egy olyan vas-tagnyakú magyar delegátust, aki kölcsönözhetne volna az ingét. *Gillemot*-t még az ilyen bakik sem hozták ki nyugalmából.

Magyarország, 1963-ban a Gépípari Tudományos Egyesület képviselőjében lépett be a Nemzetközi Hegesztési Intézetbe. (IIW). A Magyar Nemzeti Bizottságot *Gillemot*, *Zorkóczy* és *Bálint* professzorok vezették, *Bácsi Endre* lett a titkár. Az MNB tagjainak kiválasztásakor az alábbi szempontoknak kellett érvényesülni:

- a bizottság szakterületének átfogó ismerete (külföldi szakirodalom),
- angol, vagy francia nyelvismeret (tárgyalási fokon),
- kifogástalan emberi magatartás,

amihez *Gillemot* viccesen hozzá tette: „a plafonra köpni tilos”.

Egyetlen egyszer láttam *Gillemot*-t szomorúnak, elkeseredettnak, amikor „felső utasításra” abba kellett hagynia a végső sikerrel kecsegtető, félüzemi titánygyártást a Fémipari Kutató Intézetben.

Gillemot gondosan választotta meg adjunktusait, tanársegédeit. A docensek még *Misángyi* professzor kiválasztottjai voltak. A „csapat” jól összekovácsolódott, ami nemcsak a szakmai munkában mutatkozott meg, hanem a sportban és a társadalmi életben is. Az emeleten volt egy pingpongasztal felállítva. Néha késő estig üttük a labdát. A mai aerodinamikai tanszék helyén tenispálya volt. *Gillemot* és *Konkoly Tibor* itt szoktak teniszezni.

A tanszék rendszeresen részt vett a tanszékek közötti futballmeccseken, a régi MAFC pályán. *Gillemot* szabályos futbaldresszben, minden meccsen részt vett. A tanszék népszerűségére jellemző a diákok lelkesedése, amikor a tanszéket „trusztit-szorbit-martenziit” kiáltással buzdították.

Az evezés *Gillemot*-n kívül csak kevés asszisztensnek volt hobbija. *Gillemot* prof. rendszeresen evezett Gödön. Sajnos éppen a gödi szigeten, pihenés közben, érte a halál egy rettenetes vihar után.

Prof. Dr. Gillemot László kiváló „ember”, tudós, pedagógus volt, akit

nemcsak az egyetemi hallgatóság tisztelt és szeretett. Ki tudja hány lány rajongott érte, hiszen női szemmel kifejezetten csinos férfi volt.

Röviden a tanszék társadalmi életéről

Az ötvenes évek elején még rendszeres volt a szombat déli sörözés a „Kis Rabló” sörözőben. Nemcsak a sör élvezete volt a cél, hanem a tanszék asszisztenciájának összekovácsolása, sőt szakmai, tudományos témák megvitatása is.

A tanszéki asszisztencia szellemiségét jellemezték az egyes családoknál havonként rendezett „hanglemez esték”..

Szeless Ági meghívóját idézem:

„F. hó 7.-én este ½ 7-órakor, a Belgrád rakpart 17. szám alatt, a IV. emeleti, kissé szellős (Szeless) lakás sarokszobájában, ez évben immár harmadszor kerül sor a tanszéki elemek összeolvasztására, majd a szolidusz átlépése után az átkovácsolására, abból a célból, hogy a sokalkotós ötvöztetté egybeforrasztva hallgassák végig a musikográfiai irodalom alább felsorolt válogatott remekműveit:

1./ Beethoven: Egmont nyitány

Bécs szimfonikusok Vezényel: *Hans Swarowsky*

2./ Beethoven: Fröhling szonáta

Hegedű: *Prof. G. Kullenkamp*

3./ Schumann: A-moll zongoraverseny

Zongora: *Walter Giesecking*

Vezényel: *Karl Böhm*

4./ Mozart: Kis éji zene

Bécsi szimfonikusok

Vezényel: *Hermann Scherchen*

A műsoron közkívánatra modifikálás is eszközölhető, mely akár kontrakció, akár pedig nyúlás formájában megnyilvánulhat. A komplex ötvözet hőkezelésére, illetve a kalóriaszükségletének biztosítására liszt-só-vaj eutektikum, valamint koffein-sacharose folyékony oldat és B/or/ vegyület fog szolgálni. Magas fokú remanencia-igény esetén az ötvözet alkotói intenzív páros helycseréjére is sor kerülhet, amit vulgárisan táncnak neveznek.

Szeretném ha (itt a meghívott neve szerepelt) is áthatná a kollektíva coercitív ereje és részt venne ezen az összeolvasztáson.

Budapest 1952.november 3.”

Szerkezeti anyagok fejlesztése és vizsgálata fémfizikai alapokon.

Gillemot Ferenc*

Bevezetés

A fém szerkezeti anyagok fejlesztése hosszú időre nyúlik vissza. Nagyon régen használnak acél és egyéb fém fegyvereket, szerszámokat. Az acélgártás egyik leginnovatívabb periódusa volt a 1800-as évek közepétől a második világháborúig terjedő időszak. A Széchenyi Lánchíd már a 18. század közepén jó minőségű acélból épült fel, és egyes darabjai még ma is szolgálatban vannak. Hasonló korú acélszerkezetek megtalálhatók Európa számos országában. A második világháború előtt már ismertek voltak az alacsonyán ötvözött és a saválló acélok. Jelentős volt a hazai kohászat és metallurgia is. Pl. Verő József 1938-ban már angol nyelven publikálta a saválló acélokon elért vizsgálati eredményeit [1]. Az első világháború előtt a fejlesztés főként empirikus úton történt, az acélgártók tapasztalataik alapján választották ki a legjobb gyártási eljárásokat és alkalmazták az ötvözőket. A két világháború között nagyot fejlődött a kémia és a metallográfia. Az acélok minősítésére először széles körben bevezették a szakító vizsgálatokat, majd a Charpy féle ütésművel végzett szívóssági méréseket.

A korszerűsödő kutatólaboratóriumok munkája nyomán megjelentek a fázisdiagrammok (pl. vas-szén állapotábra stb.) és kezdték az ötvözetek tulajdonságait tudományos alapokon javítani, új acélfajtákat kidolgozni. Bár a haladás azóta is folyamatos, mai is főként azokat a szerkezeti acélokat használjuk, amelyeket ebben az időszakban elsősorban Németországban fejlesztettek ki, és az elmúlt 60 évben csak finomítások történtek a gyártásban és a minőségben egyaránt. Ennek a bizonyítására az 1. ábrán bemutatom Gillemot László 1947-ben kiadott „Fémek technológiája” 1. kötet „Fémek alakítása hőhatással” című könyvéből [2] a króm-nikkel acélok szövetelem ábráját. A magyar anyagtudománynak és oktatásnak az 1940-es években elért szintjét jellemzi, hogy az idézett tankönyv (amelyet két évvel egy mindent dönktető háború után adtak ki) nagyrészt ma is aktuális alapismereteket foglal össze. Ebben az időszakban Magyarországon számos ismert professzor oktatta a fém szerkezeti anyagokat világszínvonalon (pl. Verő József, Káldor Mihály, Geleji Sándor, Gillemot László, Zorkóczi Béla) és sok kiváló – ma is használható – tankönyv jelent meg. Meglepő módon a 1947-ben a Műegyetemi hallgatóknak már a fémfizika alapjait is oktatták. Az 1. ábra a fenti könyvből beszkenelve a fémek rác-

* Dr. Gillemot Ferenc MTA Energia Kutató Intézet
A 6. Anyagvizsgálat a Gyakorlatban Szemináriumon (2010.12.06.07. Cegléd) elhangzott előadás írott változata

szerkezetének alaptípusait és az ausztenites CrNi acélok szövetelem ábráját mutatja be.

Az 1950-től a mai napig terjedő időszakban elsősorban a folyáshatár, kúszási határ, fátadási szilárdság, korrózióállóság és a hegeszthetőség növelése volt a cél, ennek megfelelően a cégek saját márkanameik alatt nagy számban hozták piacra a már ismert ötvözetek az adott célt szem előtt tartó továbbfejlesztett változatait, de nagy áttörés az acélminőségek területén nem történt. Gyorsan fejlődtek azonban az egyéb fémes anyagok (pl. titán, alumínium, magnézium, cirkónium, és nikkel bázisú ötvözetek).

Az energetikai iparban a szerkezeti acélok fejlesztési irányai.

Az energetikai ipar az erőművek maximális üzemi hőmérsékletének a növelésében érdekelt, mert ezáltal lehet növelni a hatásfokot és csökkenteni a környezet szennyezését. A ma üzemelő atomerőművek üzemi hőmérséklete a 270–320°C tartományban van. A korszerű nyomottvízes és nehézvízes atomerőművekben nem a nyomástartó szerkezeti anyagok, hanem a fűtőelem burkolatok anyaga szab határt az üzemi hőmérséklet emelésének. A fűtőelemek belső és felületi hőmérséklete több száz °C-kal meghaladja a hűtőközeg hőmérsékletét, azért, hogy a keletkező hőt le tudják adni (a felületi hőterhelés 1–10 MW/m²). A ma használt cirkónium burkolat üzemi hőmérséklete viszont nem lehet több mint 5–600°C. A jövőbeli (4. generációs) atomerőműveknél más hűtőközeget és keramikuss vagy ODS acél fűtőelem burkolatokat fognak használni és ezzel együtt az üzemi hőmérséklet is növekszik, ez pedig már 400–1100°C-on is kúszás- és neutronsugárzásálló szerkezeti anyagokat követel meg. (2. ábra) [3].

A 2. ábra összehasonlítja a mai atomerőművek és a tervezett jövőbeli nukleáris és fúziós erőművek anyagaival szemben támasztott követelményeket. Jól látszik, hogy egyedül a szuperkritikus könnyűvízes reaktor építhető meg a mai ismert szerkezeti anyagokból, de még ennél is probléma a fűtőelemek burkolata. Az acéloknak nagy a neutron elnyelő képessége, azaz egy acél burkolat erősen rontja a fűtőelemek kiégési szintjét. A nagy neutronsugárzásnak (néhány dpa felett) kitett alkatrészeknél a sugárzás okozta elrúgódás mellett a tágulás („swelling”) a másik probléma. A magas hőmérsékleten alkalmazható ausztenites acélok rácsába könnyen beékelődhetnek a szennyező atomok és a nukleáris reakcióból keletkező hélium, emiatt több százalékkal megnő az

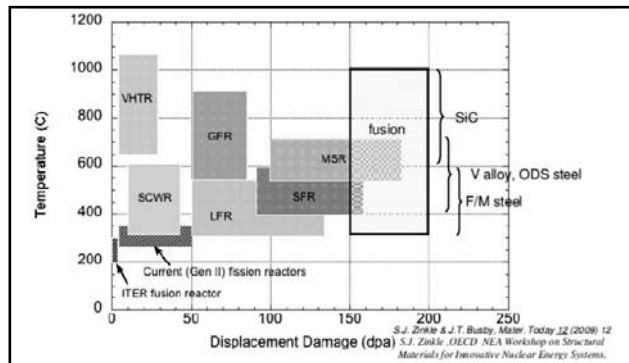


1. ábra. Az ausztenites korrózióálló acélok szövetelem ábrája és a fémek köbös térrácsának a változatai dr. Gillemot László 1947-ben kiadott tankönyvéből.

anyag térfogata. Ez viszont nem megengedhető, mert a különböző mértékben távoluló szerkezetek rossz illeszkedése okoz problémát.

A hagyományos erőműveknél az 1960-as években elérték az 540–560°C maximális gőzhőmérsékletet, azóta a fejlődés szerkezeti anyag hiányában leállt.

A 90-es évek végén megindult a kutatás magas hőmérsékleten üzemeltethető és sugárzásálló szerkezeti anyagok fejlesztésére. Emellett természetesen a korrózió- és erózióállóság, és az előállítási ár is fontos. További szempont a nukleáris berendezéseknél, hogy kevésbé aktiválódjanak, illetve elég gyorsan csökkenjen a rádióaktivitás szintje ahhoz, hogy belátható időn belül (50–100 év) újrahasznosítható legyen a szerkezeti anyag. Ez a követelmény eleve kizárja néhány az acéliparban kedvelt ötvöző alkalmazását (pl. nikkel, kobalt, réz stb.).

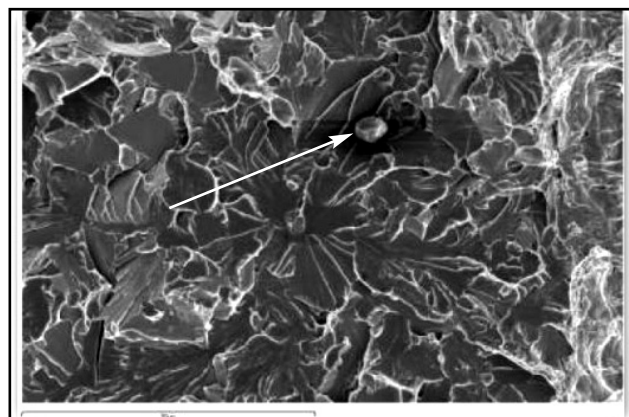


2. ábra. A jövő nukleáris és fúziós erőművi anyagaival szembeni követelmények.[3] (ITER= jelenleg épülő kísérleti fúziós berendezés, VHTR=magas hőmérsékletű gázhűtésű reaktor, GEN2= jelenleg üzemelő 2 generációs atomerőmű, SCRW=szuperkritikus vizes reaktor, LFR=ólomhűtésű gyorsreaktor, SFR=nátriumhűtésű gyorsreaktor, GFR=gázhűtésű gyorsreaktor, Fusion=fúziós reaktor, dpa="displacement per atom" azaz egy atomot hányszor mozdított el a neutronok ütközése)

A jövő szerkezeti anyagainak a tervezése fémfizikai vizsgálatok és modellek alapján

A számítástechnika és elektronika lehetővé tette egyre jobb felbontással a fémek szerkezetének még részletesebb vizsgálatát. A tipikus mikroszerkezeti vizsgálati módszerek az 1. táblázat foglalja össze [4]. Különösen nagy jelentősége van a kutatásban az atompróba mikroszkópos vizsgálatoknak (APFIM), a nagy felbontású transzmissziós elektron mikroszkópnak TEM, a kis-szögű neutronsórásnak (SANS), és a pásztázó elektronmikroszkópnak (SEM). A következő ábrák erre mutatnak be néhány példát.

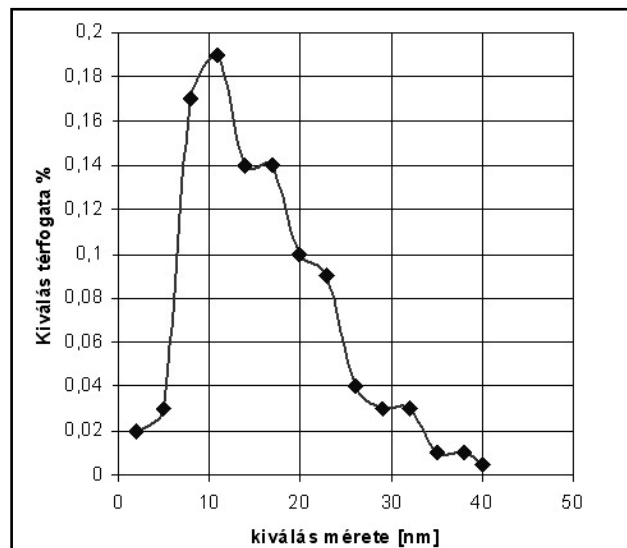
Pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatokkal megállapításra került,



3. ábra. Szulfidzárványból kiinduló törés scanning elektronmikroszkópos képe

1. táblázat. Az acélok fejlesztésében és vizsgálatában a leginkább alkalmazott mikroszerkezeti vizsgálatok és fő alkalmazási területük (K=kiválások, A= alapanyag (mátrix), Sz=szemcsehatár)[4]

Alkalmazható vizsgálati technika	Mit vizsgál?	Mire használjuk?
Transzmissziós elektron mikroszkóp (TEM), (FEGSTEM)	K, A, Sz	A láthatóság határa: 2 nm. Kiválások, diszlokációk és szemcsehatár Mikrokémiai analízis lehetséges EDX és EELS használatával.
Mikró elektron próba (EPMA)	K, A	Mikrokémiai analízis EDX és EELS használatával elsősorban zárványokon és másodlagos fáziskiválásokon. Hegesztési varratok.
Nagyfelbontású elektron-mikroszkóp (HREM)	K, A, Sz	Nagyon vékony rétegek vizsgálata, diszlokációk, kisméretű kiválások.
Atom próba mikroszkóp (APFIM) (POSAP or OAP)	K, A, Sz	Kis térfogatok atomi méretű vizsgálata
Kisszögű neutron szórási (SANS) and Diffúz rugalmas neutronsórási (DENS)	K, (A)	A kiválások mennyisége és mérete
Pozitronannihiláció (PA)	K, A	Információ a mátrix hibákról és diszlokációkról. Bonyolult értékelés.
Belső sűrűdés (IF)	K, A	Oldott gázok (Snoek effect). Diszlokációk orientáció változása és egymásra hatása (Granato-Lücke effect).
Mössbauer spektroszkóp (MS)	K, A	Oldott réz és karbon, karbidok kimutatása
Barkhausen zaj (mágneses és akusztikus) (BE,MAE)	K, A	A mozgó doménfalakat blokkoló kiválások észlelése. Korreláció az elridegedésel?
Auger Spektroszkópia (AES)	Sz	A töretfelületeken kivált foszfor vizsgálata
Másodlagos ion tömeg-spektrométer (SSIMS/DSIMS)	K, Sz	Mikrokémiai analízis. A szemcsehatárokon kiválások analízise.
Pásztázó alagút mikroszkóp (STM)	K, (Sz)	Atomi szintű felbontással a felület vizsgálata. Érzékeny az oxidált felületre, szennyeződésekre.
Precíziós dilatométer	K, A	A pontszerű rács hibák és a sugárkárosodás által okozott duzzadás mérése

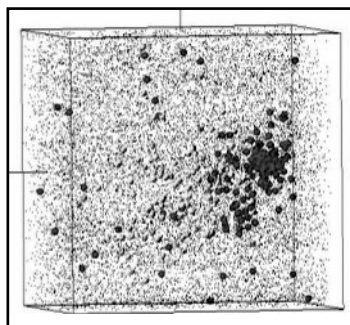


4. ábra. Kiválások mérete és eloszlása SANS-al meghatározva egy reaktortartály acélban

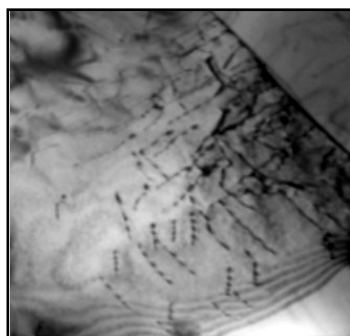
hogy a ridegtörés kiindulási helyei az acélokban a karbid és a szulfid zárványok (3. ábra).

A szerkezeti anyagok öregedése a diszlokációk számának növekedésével, és fáziskiválások létrejöttével történik. A kiválások méretét és eloszlását kis-szögű neutronsórással lehet meghatározni. Az 4. ábra bemutatja egy reaktoracélban a kiválások méreteit és eloszlását kis-szögű szórással meghatározva.

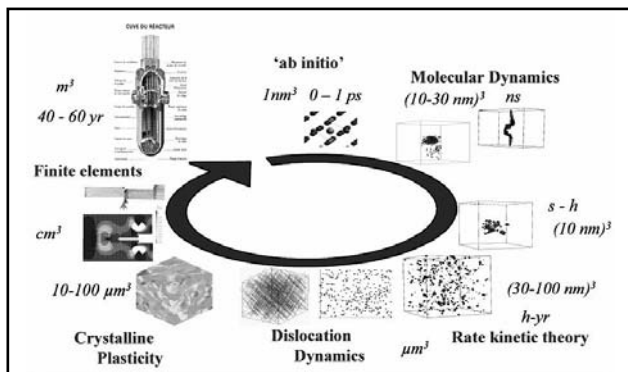
A 5. ábra foszfor és réz kiválások összetételét és alakját mutatja be atompróba mikroszkópos felvételen, míg a 6. ábrán egy besugárzott reaktoracélban a diszlokációkat ábrázolja transzmissziós elektron-mikroszkóppal készített képen.



5. ábra. Foszfor és rézatomok kiválása neutron-besugárzás hatására. 3 dimenziós APFIM felvétel. A kocka élhossza 5nm



6. ábra. Diszlokációk reaktoracél szemcsehatárán



7. ábra. A PERFECT projekt a nanométeres mikroszerkezet modellezéséből kiindulva határozza meg a tízméternél hosszabb reaktortartályok szerkezeti anyagának tulajdonságait sugárkárosodás után.

„PERFECT” projekt felépítését mutatja be a 7. ábra. A projekt célja az volt, hogy az atomos szerkezetből indulva modellezze a reaktoranyagok sugárkárosodás által okozott öregedését. Az elkészült modell jól használható az oktatásban és a károsodási folyamatok megértésében, de nem elég pontos a gyakorlat számára, mert csak 2–3 ötvöző elem hatását tudja elemezni, míg a valóságban legalább egy tucat ötvöző és szennyező elem, valamint a gyártástechnológia is befolyásolja a sugárkárosodás mértékét.

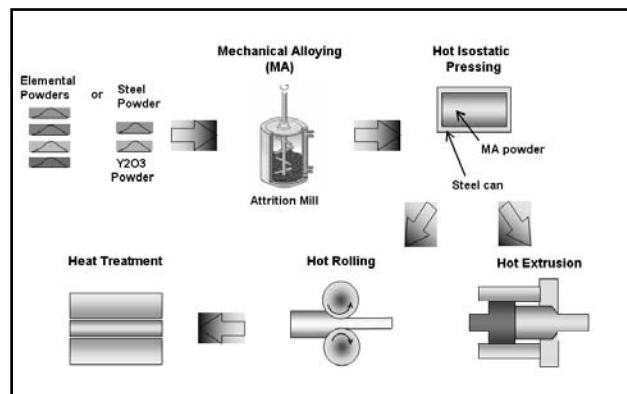
A hagyományos kúszásálló acélokban króm, nikkel, molibdén, vanádium ötvöztést alkalmaznak és a kiváló karbid fázisok blokkolják a diszlokáció mozgását. Mikroszerkezeti vizsgálatok azonban kimutatták, hogy ezek a kiválások nagyok a diszlokációkhoz képest és emiatt csak részlegesen blokkolják a diszlokációkat, a diszlokáció többsége zavar-talanul tud mozogni. Ebből egyenesen következett az, hogy nanoméretű keramikus szemcséket kell az acélba keverni és ezekkel blokkolni a diszlokáció mozgását. Az ilyen acélokat ODS acéloknak nevezik (oxid dispersion strengthened steel). Az ODS acélok gyártása jelenleg csak laboratóriumi méretekben megoldott és igen drága, továbbá a szoba-

hőmérsékleten mért szívóssági tulajdonságaik nem túl jók. Legújabbban olyan acélokról is hallani, amelyeknek a szemcsemérete 10 és 100 nanométer között van, és a szemcsehatárok blokkolják a diszlokációkat. Ez esetben nem kell a ridegítő (ridegtörési hajlamosító) keramikus részecskéket beötvözni az acélba, viszont a gyártástechnológia jelenleg még nem ismert, és kérdéses, hogy a laboratóriumi minták után a valódi szerkezetek gyártása is megvalósítható-e.

A nanoszerkezetű acélok gyártástechnológiája.

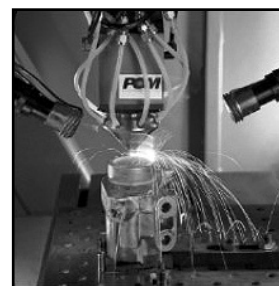
Számos technológiát és ezek variációit kipróbálták az ODS és egyéb nanoszerkezetű acélok gyártására. A legismertebb az úgynevezett „HIP” acélok. Az ötvöztet vagy a komponenseit nanoméretű porrá őrlik mal-mokban, vagy plazmával felolvasztják és gázáramba fújják bele, ahol elporlad. A porba belekeverik a porított ötvöző anyagokat és a nanoméretű kerámia szemcséket (a leggyakrabban ittrium oxidot használnak 0,1–0,5% mennyiségben). Ezután golyós őrlőmalomban őrlik, és evvel egyidőben a golyós malom nagy nyomással hideghegesztéssel egyesíti a kerámia és az acél szemcséket. A kapott port saválló acél tubusba töltik, a tubusból kiszívják a gázokat és légmentesen lezárják. Kémencében 1000–1400°C-ra hevítik és 1000–2000 bar külső nyomásnak teszik ki a darabokat. A burkolat a nagy nyomáson összepréselődik a benne levő acél porral együtt. Ezt nevezik hipping-nek (hot isostatic pressurizing). Az így kapott ötvöztött anyagot megalakítják hogy a végső formát megkapják. A teljes folyamatot sémátikusan a 8. ábra mutatja be.

Porkohászati hip-elt munkadarabok már ipari méretekben is léteznek

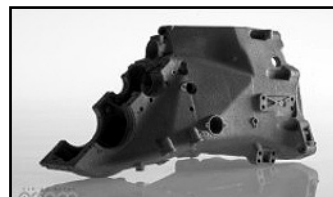


8. ábra. Nanoszemcsés acél porkohászati (hip) gyártásának sémája

(pl. több száz kilós bonyolult alakú alkatrészeket gyártanak tenger-alattjárókba), azonban ODS acélból még csak laboratóriumi, vagy néhány kilós kísérleti adagokat tudtak gyártani, ipari méretű gyártástechnológia még nincs kidolgozva. Valószínűleg ODS acélokból nem reaktortartályokat, hanem fűtőelem burkolatokat, gázturbina lapátokat és más limitált méretű alkatrészeket fognak gyártani.



9. ábra. Mikroszemcsés fém-szórás nyomtató



10. ábra. Bonyolult alkatrész mikroszemcsés fém-szórással készítve

csék felületét bevonják atomi vastagságú fémréteggel (pl. fémgőzöléssel), és ekkor ultrahangos keveréssel már homogénen el lehet osztani az acélban. Így öntött ODS acélt lehet előállítani, talán megoldható a nagyobb mennyiség gyártása is, de az acél kevésbé finomszemcsés és több benne a szennyező, mint a HIP-elt porkohászati gyártmányokban.

Végül egy olyan technológia kifejlesztésén is dolgoznak, amely a háromdimenziós nyomtatókhöz hasonlóan elektronsugárral vagy plazmával megolvasztja a nanoszemcsés fémport és fémszóráshoz hasonló módon viszi fel a felületre. A fémporok összetételének a szabályozásával megoldható olyan munkadarab készítése, amelynek a rétegei erősen eltérő ötvözetek (pl. a belső része szívós, a felület kemény) és egyéb eljárással nem gyártható bonyolult alakú üreges munkadarabok is előállíthatóak.

A nanoszerkezetű anyagoknál az gyártástechnológiától függően az anyagvizsgálatot is meg kell változtatni. Olyan módszerekre lesz

szükség, amelyekkel ellenőrizni lehet a darabok homogenitását, a szívósságát és a szilárdságát lehetőleg roncsolásmentesen, vagy azonos technológiával gyártott próbadarabokon. A nagy felbontású mikroszkópok, és az egyéb mikroszerkezeti vizsgálati módszerek jelentősége a jövőben növekedni fog.

Hivatkozások:

- [1] *Dr. Verő József*: Notes on etching inoxydisable steels. Mitt. Sopron 10 (1938)
- [2] *Dr. Gillemot László*: Fémek Technológiája. Egyetemi Nyomda. Budapest 1947
- [3] *S.J. Zinkle, J.T. Busby*, Materials Today 12 (2009)
- [4] *V. Slugen, F. Gillemot*: "VVER Reactor pressure vessel ageing" COVERS FP6 project workshop for students

Az anyagvizsgálat fejlődése hazánkban az elmúlt évszázadban

Tóth László¹

Bevezetés

Alapvető emberi tulajdonság az, hogy a felmerült problémákra megoldásokat keresnek, vagy azért mert biztonságban szeretnék érezni magukat, vagy azért, mert a bekövetkezett káros eseményekből tanulni szeretnének. Tökéletesen így van ez társadalmunk minden szegmensében, így a műszaki-gazdasági életben is. Amennyiben csupán a hazai anyagvizsgálat kialakulására, fejlődésére koncentrálnánk, akkor a következő tényezőket kell figyelembe venni:

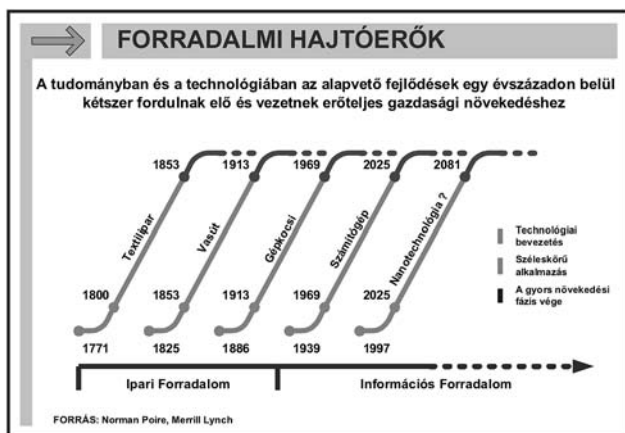
- az emberiség történetében mindig voltak, vannak és lesznek is olyan műszaki alkotások, amelyek egyrészt a gazdaságot, másrészt az emberek egymáshoz való viszonyát tükröző társadalmat alapjaiban formálják át,

- hazánk földrajzi elhelyezkedése miatt mindig is szervesen kötődött az európai trendhez, következésképpen szükségszerű nyitottsága miatt nem függetleníthette az általános tendenciáktól.

Ami az ugrásszerű fejlődést, a minőségi változások hajtóerejét illeti ezek közös jellemzője az, hogy mindegyikének három periódusa van:

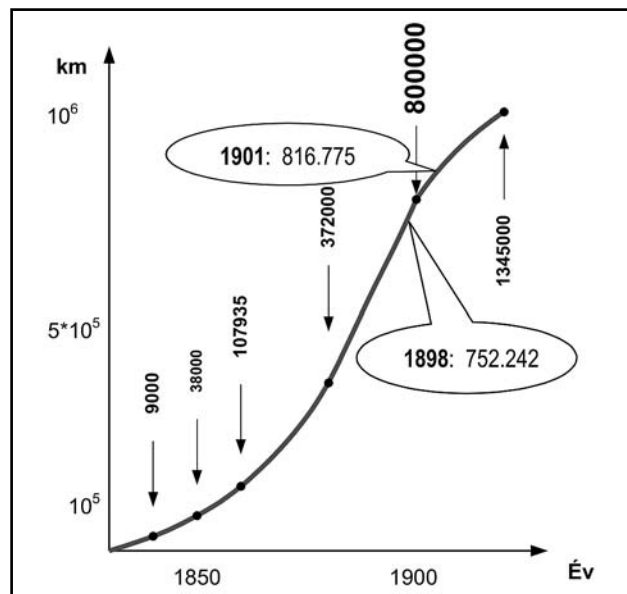
- A megjelenése és bevezetése, azaz a „penetrációs” időszaka, ami általában 20-30 év.
- Ezt követi a második a fellendülés szakasza, az a periódus, amikor hatása teljes mértékben érvényesül, és eredményeképpen átalakulnak a gazdasági és társadalmi viszonyok.
- Időben a harmadik szakasz a „kifulladás” periódusa, amely akár 40-50 évet is átfoghat. E periódust egy újabb hajtóerő megjelenése is jellemzi, amely fokozatosan átveszi a korábbi mozgatórugó szerepét, csupán nagyobb léptékben fejt ki hatását.

Az előzőekben vázolt gondolatmenetet az 1. ábra maradéktalanul alátámasztja mind a számadatok, mind pedig a hatások tekintetében. Ez utóbbit nézve, míg a „textilipar” lokális szerepet töltött be a viszonyok alakításában és ez folyamatosan bővült a „vasút”, „gépkocsi” megjelenésével, addig a „számítógép” a világunkat tette „nagyon kicsi méretűvé”, a „nanotechnológia” pedig az emberiség létfeltételeit fogja átalakítani mind az „embert” önmagát, mind pedig a „létfeltételeket” tekintve.



1. ábra. Az emberiség lehetőségeit átforgató forradalmi hajtóerők

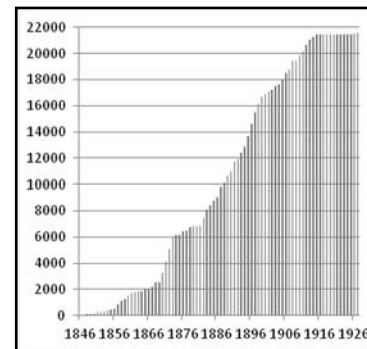
A mechanikai anyagvizsgálat kialakulását, fejlődését illeti, ebben meghatározó szerepe a gőzgép – mint folyamatosan felhasználható energiaforrás – megjelenése és széleskörű alkalmazhatósága volt. Ha



2. ábra. A világ vasúti hálózatának növekedése

csupán a menetrendszerűvé vált vasúti közlekedést tekintjük a gőzgép egyetlen alkalmazásának (ami messze nem igaz), akkor is döbbenetes fejlődésről kell beszélnünk. Az 1825. szeptember 27.-én 39 km-es távon megindult vasúti közlekedés bővülésének ütemét a 2. ábra szemlélteti. Az itt szereplő adatokat korábban (a '80-as '90-es években) különböző közlekedési múzeumokban gyűjtöttem. Ezek helyességét a Magyar Mérnök- és Építész Egylet Közleményei c. folyóiratokban közölt adatok utólagosan messze-ménően igazolták. A XIX. század végéig az évente több mint 10.000 km hosszúságban épített vasútvonal a mérnöki tudományok, az anyagtudomány, anyagvizsgálat rohamos fejlődésének rendkívüli hajtóereje volt. Az elért eredményekkel kapcsolatban számos rövidebb-hosszabb áttekintés született [1-6]. Hasonló diagram szerkeszthető a hazai vasúthálózattal kapcsolatban is. A [7] munka időrendi sorrendben felsorolja a hazánkban létesített vasútvonalak átadási időpontjait és hosszát 1846–1927 között. Az ebből szerkesztett diagramot szemlélteti a 3. ábra. Az 1846. július 15.-én Pest és Vác között a Magyar Középponti Vasút Társaság által megnyitott 33,9 km hosszúságú szakasz a századfordulóra, azaz 54 év alatt 17.245 km-re gyarapodott. Az ábrán közölt adatokból látható, hogy a kiegyezés előtt évente több mint 100 km, a kiegyezés után pedig évente mintegy 450 km hosszban fektettek le új vasútvonalat.

A múlt század második, háborúktól mentes periódusában végbement igen nagyarányú fejlődés hajtóereje kétségtelenül a vasúti közlekedés általános térhódítása volt. Ebből adódóan az anyagvizsgálat fejlődését is alapvetően ez moztította. A fejlődés egyes mozzanatait foglalja össze az 1. melléklet, amelyben kiemelten tüntettük fel a hazai főbb eseményeket.



3. ábra. A hazai vasúthálózat növekedése

¹ egyetemi tanár Debreceni Egyetem, Miskolci Egyetem, Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Köhasznú Nonprofit Kft. Logisztikai és Gyártástechnikai Intézet (BAY-LOGI)

Az anyagvizsgálat fejlődése hazánkban a nemzetközi tendenciák tükrében

A szabadságharc bukása után hazánk műszaki színvonalának emelkedését nagymértékben visszahúzta az 1867-ig tartó megtorlás. Ennek ellenére is több mint 100 km-rel bővült a hazai vasútvonalak hossza évente! A kiegyezést követően a fejlődés ugrásszerű volt. Ennek egyik látható jele volt a két műszaki folyóirat szinte egyidejű megjelenése (**Magyar Mérnök- és Építészegylet Közlönye**, **Bányászati és Kohászati Lapok**). Ezekben (az INTERNET-en is teljes terjedelmükben elérhető) megjelent közlemények tartalmukat tekintve a kor tudományos vérkeringésébe estek. Ez jól nyomon követhető az e folyóirat lapszemléiben, tudósításaiban.

A nagytömegű anyagfelhasználás mintegy kikényszerítette egyrészt az alkalmazott anyagátvételi eljárások egységesítését (mai terminológia szerinti szabványosítást), másrészt újabb vizsgálati eljárások kidolgozását. Mindezek pedig a szakemberek együttműködését követelték meg. Ezek együttesen vezettek a különböző **laboratóriumok létrehozásához és szervezetek megalakításához**.

Hazánk mindkét területen az élenjáró országok csoportjába tartozott, hisz Münchenben, Bécsben és Budapesten szinte azonos időben alapítottak anyagvizsgáló laboratóriumokat. A vizsgálatok szabványosításának érdekében a német *Johann Bauschinger* által indított konferenciasorozat (München–1884, Drezda–1886, Berlin–1890, Bécs–1893) munkájába a magyar szakemberek is igen intenzíven bekapcsolódtak (döntően Nagy Dezső vezetésével). Bauschinger halálát (1893) követően a műszaki szakemberek által jól ismert **Tetmajer Lajos** vezetésével a Zürichben, szervezett konferencián (**1895. szeptember 9–11.**) megalakult az **Anyagvizsgálók Nemzetközi Szervezete**. A centenáriumi alkalmából 1995. december 19.-én a Miskolci Akadémiai Bizottság „Tetmajer-Emlékülés”-t szervezett, amelynek kiadványában helyet kapott Jan Zielinski Tetmajer Lajos életéről írt könyvének magyar nyelvű fordítása is. Az anyagvizsgálók nemzetközi közösségének formálásra a szervezet periodikusan szakmai rendezvényeket szervezett a következő időpontokban és helyszíneken:

- 1895 I. Anyagvizsgálók Nemzetközi Szervezetének Kongresszusa, Zürich,
- 1897 II. ANSZK, Stockholm (Augusztus 13-15.)
- 1901 III. ANSZK, Budapest (Szeptember 8-13.)
- 1906 IV. ANSZK, Brüsszel (Szeptember 5-9.)
- 1909 V. ANSZK, Koppenhága (Szeptember 7-11.)
- 1912 VI. ANSZK, New York (Szeptember 3-7.)
- 1915 VII. ANSZK, St. Pétervár (Szeptember 11-17.)
- 1927 VIII. ANSZK, Amszterdam
- 1931 IX. Anyagvizsgálók Új Nemzetközi Szervezetének Kongresszusa, Zürich (Szeptember 11-16.)

A nemzetközi szervezet megalakulását követően először a **Német Anyagvizsgálók Egyesülete** (1896. október 25., Karlsruhe) majd pedig a **Magyar Anyagvizsgálók Egyesülete** alakul meg (1897. június 16.). Ez lehetővé tette, hogy hazánk az 1897. augusztus 23–25. között Stockholmban megrendezett VI. Kongresszuson már önállóan jelenhe-tett meg. Az egyesület elnöki tisztségét, annak megszűntéig a következő szakemberek töltötték be:

- 1897–1904 **Czigler Győző**, építész, (Arad, 1850.07.19. – Budapest, 1905. 03. 28.)
- 1904–1910 **Nagy Dezső** gépészmérnök, (Székesfehérvár, 1841. 12.6 – Budapest.03.19.)
- 1910–1914 **Czekelius Aurél**, hidász, (Csiklovabánya, 1844. 10.05. – Budapest. 1927. 11.14.)

- 1914–1917 **Rejtő Sándor**, gépészmérnök, (Kassa, 1853.08.21. – Buda-pest, 1928.02.04.)
- 1917–1924 **Zielinski Szilárd**, építész, (Mátészalka, 1860.05.01.- Budapest, 1924.04.24.)
- 1924–1927 **Gállik István Dömötör**, hidász, (Pest, 1866.03.02.- Budapest, 1945.04.06.)
- 1927–1930 **Czakó Adolf**, hidász, (Pest, 1860.02.04.-Budapest.01.28.)
- 1930–1934 **Zorkóczy Samu**, kohász, (Radvány, 1869.11.09.- Budapest, 1934.04.25.)
- 1934–1939 **Mihalich Győző**, vasbeton, (Temesrékás, 1877.10.14.- Budapest, 1966.03.18.)
- 1939–1942 **Quirin Leo Lipót**, kohász, (Dillingen 1878.03.25.- Budapest, 1943.10.16.)
- 1942–1944 **Misángyi Vilmos**, gépészmérnök, (Pécs, 1880.01.08.- Teisbach 1948.04.19.)

Az elnökök névsorát és szakmai tevékenységét tekintve általánosságban azt mondhatjuk, hogy a hazai anyagvizsgálat meg-vagy elindulásában az építész és hidász szakma meghatározó volt, legálábbis az 1930-as évekig. A gépészeti vonalat Nagy Dezső és Rejtő Sándor erősítette.

Az egyesületi munka a II. világháború utolsó évében megszűnt. Ezt követő években pedig a szakmai tevékenység más szervezeti formában, az 1948. június 15.-én megalakult Műszaki és Természettudományi Egyesületek Szövetsége keretében az 1949. február 19.-én létrejött Gépipari Tudományos Egyesület technológiai szakosztályába terelődött. Önálló szakmai élet csupán az 1957. július 4.-e után kezdődött újból, amikor megalakult a GTE Anyagvizsgáló Szakosztálya *Gillemot László* akadémikus elnökletével; alelnök: *Zorkóczy Béla* a Nehézipari Műszaki Egyetem tanszékvezető tanára, titkára pedig Réti Pál, a csepeli anyag-vizsgáló osztály vezetője. Az elmúlt 50 év történéseit dr. Lehofer Kornél foglalta össze részletesen, aki 1969–1980 között a szakosztály titkára, 1980-1985 között pedig elnöke volt. Napjainkat tekintve pedig azt moshatjuk, hogy a GTE keretében az anyagvizsgálat elhalt, megszűnt, viszont 2012-ben (az eredeti alapításának 115. évfordulója alkalmából) újjáalakult a Magyar Anyagvizsgálók Egyesülete, elfogadott Alapszabállyal. Látható azonban az is, hogy az egyesületi életet döntően a fővárosban, a műegyetemen formálták, alakították mind a hazai, mind pedig a nemzetközi kapcsolatok tekintetében. Ez utóbbi sikerességét meggyőzően igazolja az, hogy az **Anyagvizsgálók VII. Nemzetközi Kongresszusát** Budapesten tartották (**1901. szeptember 8–13.**).

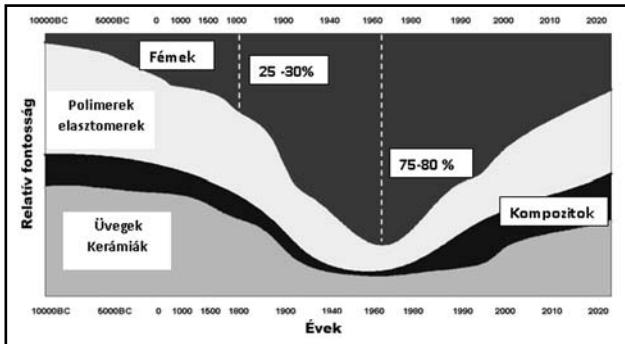
A kor szakmai színvonalát, központi kérdései, azok változásának tendenciája jól nyomon követhető az elhangzott előadások témaköreinek arányából. Ezt szemlélteti az 1. táblázat.

Látható, hogy a századforduló meghatározó témája az anyagok szállítási feltételeinek egyértelmű definiálása, azaz a vizsgálati módszerek szabványosítása volt. E téma jelentősége a megfelelő szabványok megfogalmazása után csökkent és a további konferenciák tematikáinak súlypontja az újabb vizsgálati eljárások kidolgozása irányába mozdult el (ütővizsgálat, metallográfia, korrózió, stb). Ami pedig

1. táblázat

Az **Anyagvizsgálók Nemzetközi Szervezetének Kongresszusain** elhangzott előadások tematikáinak részaránya

TÉMA	Budapest 1901	Brüsszel 1906	Koppenhága 1909	New York 1912
Mechanika, eljárás-technika	■	■	■	■
Szállítási feltételek	■	■	■	■
Ütővizsgálat	■	■	■	■
Keményiségmérés	■	■	■	■
Metallográfia	■	■	■	■
Alapanyagok	■	■	■	■
Mágneses, elektromos mérés-technika	■	■	■	■
Hegesztés, hegeszthetőség	■	■	■	■
Tartámszilárdsági viszonyok	■	■	■	■
Korrózió, korrózióvédelem	■	■	■	■



4. ábra. A különböző anyagcsoportok relatív fontossága az emberség történetében

a felhasznált anyagok típusát illeti, kétségtelenül a legnagyobb relatív fontosság a fémes anyagokra esett. Az egyes anyagcsoportok relatív fontosságát, annak időbeli változását a 4. ábra szemlélteti.

A hazai anyagvizsgálat fejlődésében természetesen nagy szerepet játszanak azon témák, amelyek a nemzetközi konferenciákon is súlyponti szerepet töltenek be. Ebből adódóan az egyes Kongresszusokról igen részletes beszámolók készültek, amelyek vagy a Magyar Mérnök- és Építész Egylet Közleményeiben (MÉEK), a Bányászati és Kohászati Lapokban (BKL) vagy az Anyagvizsgálók Közlönyében (AK) jelentek meg. A jelenleg rendelkezésemre álló dokumentumok szerint a következő kongresszusi beszámolók kerültek publikálásra:

- 1906, Brüsszel: Gállik István, MÉEK, [9],
- 1909, Koppenhága, Sobó Jenő és Barlai Béla, BKL, [10],
- 1912, New-York, Rejtő Sándor, MÉEK, [11],
- 1927, Amsterdam, Czákó Adolf, AK [12],

A nemzetközi egyesületről, az abban folyó tevékenységek tendenciáiról igazán átfogó képet lehet kapni az említett beszámolók, ismeretéseket elolvasván. Tetszőlegesen elővéve pl. a leghosszabb, a 39 oldal terjedelmű, a Koppenhágában 1909-ben tartott kongresszus beszámolóját a következő általános és szakmai jellegű összefoglalás tehető:

• Általános megállapítások:

- a rendezvény szakmailag rangos esemény, amelyen a királyi udvar is képviseltette magát,
- hazánk jelentős létszámmal, a nemzetközi sorrendben az 5. legnépesebb delegációval képviseltette magát (58 fővel, amelyben 15 hölgy volt jelen, 1906-ban Brüsszelben 16 fő),
- a kongresszusra érkezett résztvevők száma 704 (Brüsszelben 1906-ban 533 fő)
- a kongresszuson számos magyar intézmény képviseltette magát (pl. m. kir. kereskedelemügyi és a honvédelmi minisztérium, m.kir. államvasutak, kir. József-műegyetem, m.kir. állami vasgyárak, Budapest fővárosa, Anyagvizsgálók magyar egyesülete, a Magyar Aszfalt-Részvénytársaság, Magyar Mérnök- és Építész Egylet, Országos Magyar Bányászati és Kohászati Egyesület, stb.)
- a konferencia hivatalos nyelvei: angol, francia és német,
- a szervezetet az elnök, a vezértitkár és az egyes nemezetek előljárásági tagjai vezetik (ez utóbbi azon országok választott képviselői, amelyekben működő szakmai szervezetnek legalább 20 tagja van, ezt a posztos Rejtő Sándor töltötte be ekkor).

• Szakmai megállapítások

- A Nemzetközi szervezetnek a következő három Szakosztálya van
 - fémek,
 - cement (czement), beton és kövek,
 - műszaki s ipari célokra (célokra) szolgáló egyéb anyagok.
- a kongresszus munkája az ún. hivatalos dokumentumok megvitatására koncentrál, amelynek eredményeként határozatok születnek, ezt követik az ún. nem hivatalos dokumentumok (előadások) megvitatása,

– Koppenhágában 36 hivatalos és 49 nem hivatalos dokumentum került megvitatásra

– A fémek Szakosztály központi témái:

- Metallográfia (beleértve a termikus vizsgálatokat és mikroszkópiát is)
- Keménységmérés (központi téma a Brinell és a Ludwik-féle keménységmérés információtartalma és az eredményeket befolyásoló tényezők szerepe)
- Útvehajlító vizsgálat (itt a bemetszett szakítópróbák lehetséges alkalmazásai is megjelentek Rejtő Sándor által felkarolva)
- Kifáradás (tartósság) jelensége, alapvetően a lengőszilárdság kérdéskörében
- Elektromos és mágneses jelenségek a fémek mechanikai vizsgálatánál.
- A vas- és acélszámok szállítási feltételeinek egységesítése
- Érdekességgént említhető, hogy koptatógép, a vasanyagok szikrapróbája, a rugalmassági modulus mérésére alkalmas készülék került bemutatásra, ill. Misángyi Vilmos két előadást is tartott alapvetően a képlékeny alakváltozás és kúszás folyamatához kötődően.

– A Cement, beton és kövek Szakosztály központi témái (e területen elismerésre méltó szerep jutott a magyar delegációnak Zielinszky Szilárd vezetésével)

- A vasbeton tulajdonságai külső terhelés során
- A vasbeton fizikai tulajdonságai (a hőmérsékletváltozás a beton kötése során, és duzzadás vízben)
- A vasbeton viselkedése a legkülönbözőbb külső hatásra (érintkező anyagok típusának, ill. villamos áram hatása)
- Káresetek kivizsgálása
- Vasbeton minősítésnek kérdései

– műszaki és ipari célokra szolgáló egyéb anyagok Szakosztály keretei között számos anyag tulajdonságai, ezek vizsgálata és minőségi kérdései kerültek terítékre. Így például a kaucsuk, a lágygumi, a papír (Rejtő Sándor), olajok, a gépkocsik anyagai, a vasfajták korróziója, stb.

Természetesen a hazai szakirodalomban is nagyon jól követhetően, névhez, szakemberhez kötődően megjelennek meg az anyagvizsgálati témák az egyes publikációkban. Nehéz lenne kiválasztani mindazon szakembereket, akik kisebb-nagyobb mértékben bővítették ismeretünket. A kiválasztásban két rendezővel lehetne követni. Az egyik szerint a témákat (keménységmérés, szakítóvizsgálat, útvehajlító vizsgálat, kifáradás és kúszás jelensége, még ide lehetne venni a mikroszkópos vizsgálatot is, noha ez nem mechanikai vizsgálat, de a jelenségek feltárásában általában nélkülözhetetlen, stb). A másik lehetséges szemlélet, hogy az anyagvizsgálathoz kötődő szervezet(ek) vezető tisztviselőit, azok tevékenységét ismertetem. Jelen közleményben egyik rendező elves sem követvén csupán néhány – teljes mértékben önkényes – kiemelés tesztek, alapvetően nevekhez kötve. A teljességre messze nem törekedvén álljon itt egy felsorolás név és szakmai területet említvén:

Kerpely Antal. Az alapvetően kohászati területen dolgozó kiváló szakember a vasanyagok vizsgálata, minősítésének kérdései területén maradandót alkotott az 1870–1900-as periódusban. Munkáit a BKL és MÉEK folyamatosan közölte. Eredményei áttekinthetők egyrészt a (http://hu.wikipedia.org/wiki/Kerpely_Antal) címen, másrészt a BKL teljes szövegű elérhetőségét biztosító címen <http://bkl.uni-miskolc.hu/nyito.php>) valamint az MÉEK teljes és címeiben kereshető adatbázisában <http://www.omikk.bme.hu/mee/>. A születésének centenáriuma alkal-



5. ábra. Kerpely Antal (Kürtös, 1837.02.05. – Selmecbánya, 1907.07.22.).

mából rendezett ünnepi megemlékezésen (1937. február 29.-én) Marek László méltatta tevékenységét². Halálának cente-náriumán, az OMBKE 2006. 05. 27.-én a 95. Közgyűlésen 2007-et Kerpely Antal Emlékévként nyilvánította. Ennek keretében ugyancsak számos méltatás és ismertetés jelent meg Kerpely Antal munkásságával kapcsolatosan többek között BKL-ben is³.

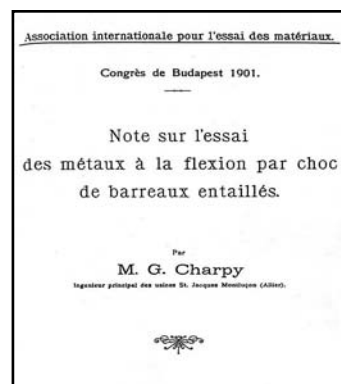
Rejtő Sándor. Alapító tagja a Magyar Anyagvizsgálók Egyesületének, az egyesület közleményeinek megindítója és szerkesztője. Szakmai tevékenysége alapvetően a mechanikai technológiák elméleti alapjainak megteremtéséhez kapcsolódott. Ezt 1896-97-ben publikálta négy folytatásos közleményben⁴, a mikroszkópos vizsgálat megindítása⁵, az anyagok mechanikai vizsgálata során végbemenő folyamatok elemzése^{6,7,8}, ráírnyította a szakemberek figyelmét hazánkban a kifáradás jelenségével való foglalkozás fontosságára. Igaz ekkor még e károsodási folyamatot a „kimerülés” fogalmával illették⁹. Ugyancsak hozzájárult a mechanika tudományterületéhez¹⁰, ill. a konkrét alakítási technológiák elméleti megalapozottságához¹¹. Mint közéleti ember az anyagvizsgálat szakmai megalapozottsága^{12,13} elismertsége¹⁴ érdekében is, valamint a Műegyetem rektoraként következetesen kiállt a mérnöki szakma megbecsülésének szükségességéért¹⁵. Az igazán tartalmas mérnöki tevékenységet folytató Rejtő Sándor 1928-ban megszakadt. Búcsúztatása Kerékgyártó Györgyre maradt¹⁶. Életének további mozzanatairól egyrészt a wikipédia, a Műszaki Nagyjaik [13], másrészt az Óbudai Egyetem Rejtő Sándor Könnyűipari Mérnöki Kar névadójának életét bemutató, várhatóan a közeljövőben megjelenő, rendkívül szép kivitellű és tartalmas könyvből kapható, a melyet az egyetem kancellárja, Gáti József állít össze.

Bartel János¹⁷. (Kepa Bogumilowicka, Tarnow mellett, 1862. dec. 1. – Budapest, 1945. jan. 31.). Gépészmérnöki diplomáját a lemergi (Lvov) műszaki egyetemen 1885-ben szerezte. Utána I. N. Franke mechanika-professzora, a Lengyel Tudományos Akadémia tagja meghívta tanársegédjének, 1887-ben az akkor magyarországi korompai vasgyárba került, ahol egy év múlva megbízták a gyár teljes átszervezésével és bővítésével. 1900-ban a korompai, salgótarjáni és ózdi gyárak egyesülésével létrejött Rimamurány-Salgótarjáni Vas- és



6. ábra. Rejtő Sándor (Kassa, 1853.08.21. – Budapest, 1928.02.04.).

Acélművek budapesti központjának főmérnöke lett. Az egyesült gyárak kohóinak korszerűsítése céljából tanulmányutakat tett Németországban, Belgiumban, Angliában és maga is végzett vas- és anyagvizsgálatokat. Az 1913-ban megjelent „Az anyag alakíthatósága” c. munkájáért a budapesti műegy. műszaki doktorrá avatta. Számos szakcikke jelent meg a Magyar Mérnök- és Építész Egylet Közleményeiben (MÉEK), a Bányászati és Kohászati Lapokban, az Anyagvizsgálók Közönyében. Ezek között cikkekből csupán néhányat, a különböző mechanikai anyagvizsgáló módszerekhez kötődőket emelek ki. Egyik legnagyobb eredménye a „vasanyagok” hazai minősítése, vizsgálata kapcsán a Rejtő-féle javaslatok gyakorlati megvalósítása. Erről egy 26 oldal terjedelmű közleményben számolt be¹⁸. A cikkel és a javaslataival kapcsolatban lefolytatott nyilvános szakmai vitákat követően egy év múlva ugyancsak visszatér erre a témára¹⁹. Mintegy tíz év múlva mechanikai és anyagvizsgáló alapkérdésekhez nyúl, a szilárdsági fogalmához, amelyet egy három részre bontott közleménysorozatban publikál²⁰. A közleményekben érintett kérdésekről Hermann Miksa és Rejtő Sándor is kifejté véleményét. A szilárdság fogalmának kérdéskörét megelőzően mintegy három évvel korábban a képlékenység, alakíthatóság tekintetében ugyanilyen alapos munkákat közöl²¹. Az 1901. szeptember 8–13. között Budapesten tartott III. ANSZK során Charpy által



7. ábra. G. Charpy publikációjának, amelyben először mutatja be az ütvehajlító vizsgálatot

bemutatott ütvehajlító vizsgálat (7. ábra) meghonosítójának ugyancsak Bartel János tekinthető. Átfogó és a részletekre is kiterjedő eredményeit az Anyagvizsgálók Lapjában részletesen ismerteté 1915-ben, két részletben, összesen majdnem 50 oldal terjedelmű közleményben²².

Az ütvehajlító vizsgálat kapcsán két hazai vonatkozású ténytet célszerű kiemelni. Az egyik, hogy három – nemzetközi szakmai szinten is jelentős centrum alakult ki e vizsgálathoz kötődően. Időrendi sorrendben a Budapesti Műszaki Egyetem Gillemot László professzor vezette Mechanikai Technológiai Tanszékén, ahol Konkoly Tibor professzor egy francia tanulmányútja során találkozott e vizsgálattal²³, Ziaja György pedig az 1960-as évek elején az akkor még NDK gyártmányú

² BKL, LXXI. 9-10 szám, p. 62.

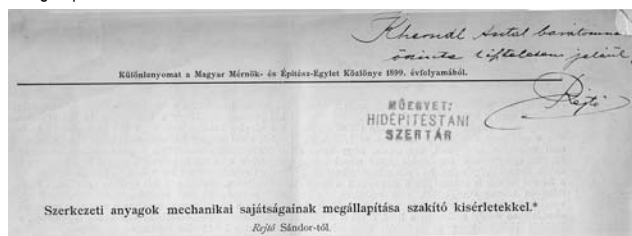
³ Lengyelné Kiss Katalin: Kerpely Antal élete és munkássága. BKL2007/1. p.2-5.

⁴ MÉEK, 1896/30/8 p. 293-308, 1896/30/9 p. 345-381, 1896/30/10 p. 413-428 és 1897/31/5 p. 197

⁵ MÉEK, 1896/30/1, p. 1-13. Rejtő S.: A vas mikroszkópos vizsgálata.

⁶ MÉEK, 1898/32/7, p. 273-286. Rejtő S.: A tárgy felszínén levő erővonalak keletkezésének módja és törvénye.

⁷ MÉEK, 1899/33/6, p. 224-257. Rejtő S.: Szerkezeti anyagok mechanikai sajátosságainak megállapítása szakító kísérlettel.



⁸ MÉEK, 1904/38/4, p. 137-155. Rejtő S.: Szerkezeti anyagok mechanikai sajátosságainak megállapítása nyíró kísérlettel.

⁹ MÉEK, 1910/44/1-2, p.1-12. Rejtő S.: fémek kimerülése.

¹⁰ MÉEK, 1912/46/2. p.24-34. Rejtő S.: a hajlítórőreknél viszonyok a feszültségekhez.

¹¹ MÉEK, 1903/37/6, p. 236-241. Rejtő S.: A hengerűregek szélesedésének kiszámítása az erőközlés törvényének figyelembevételével.

¹² MÉEK, 1905/39/1, p. 239-242. Rejtő S.: A vasanyag vizsgálata (Bartel János javaslatára vonatkozó megjegyzések)

¹³ MÉEK, 1916/50/22, p.151-157. Rejtő S.: Megjegyzések Herman Miksának Bartel János közleményéről szóló bírálatára.

¹⁴ MÉEK, 1912/46/50, p. 797-814. Hozzászólás „A M. Kir. kísérleti és Anyagvizsgáló Intézet” (az MMÉE 1912. november 28.-i ülésének hozzászólásai)

¹⁵ MÉEK, 1920/54/49-50, p.193-197, 1920/54/51-52, p.201-205, 1921/55/43., p.313-316. Rejtő S. tanévnyitó beszédei.

¹⁶ MÉEK, 1928/62/23-24. Kerékgyártó György: Rejtő Sándor (1853-1928)

¹⁷ Magyar Életrajzi lexikon. História Tudós naptár (<http://www.kfi.hu/physics/historia/historia/egyen.php?>). Sajnos fényképét nem találtam az INTERNET-en sem.

¹⁸ MÉEK, 1905/39/5, p.173-199. Bartel J.: A Rimamurány-Salgótarjáni Vasmű Rt. megbízásából készült jelentés a vasanyagvizsgálatra vonatkozó Rejtő-féle javaslatok alapján végzett kísérletekről, valamint megjegyzések ezen javaslatokhoz.

¹⁹ MÉEK, 1906/40/1, p.33-38. Bartel J.: A vasanyag vizsgálata.

²⁰ MÉEK, 1916/50/1 p.2-6, 1916/50/2 p.9-12, 1916/50/3 p.13-17. Bartel J.: A szilárdsági fogalmak Rejtő és Mohr szerint I., II. és III.

²¹ MÉEK, 1913/47/31 p. 529-537. 1913/47/32 p. 545-550. Bartel J.: Az anyag alakíthatósága. I. és II.

²² Anyagvizsgálók Közleménye, 1915/1. p. 3-28. 1915/2, 52, Bartel J.: A bemetszett rudak hajlító üttöpróbája.

²³ Konkoly T.: Gép, 1968/10. és V. Törésmechanikai Szeminárium kiadványa, 1995. 04. 3-6. p.225-237.

PSWO 30 típusjelű műszerezett ütőművön az öregedési hajlam kimutatására végzett vizsgálatainak eredményeit már az 1964-ben megvédett műszaki doktori értekezésében foglalta össze. Időrendben a második igen jelentős, és hosszú ideig meghatározó hazai centrum a Vasipari Kutató Intézetben volt, ahol az 1971-ben indult és a Rittinger János valamint Fehérvári Attila által elvégzett igen nagyszámú vizsgálat számottevően hozzájárult a törési folyamatokról és az anyagok ridegedési hajlamáról szerzett ismereteink bővüléséhez²⁴. A harmadik centrum a Miskolci Egyetem Mechanikai Technológia Tanszékén jött létre a '70-es évek második felében. E centrum Tóth László és Lenkeyné Bíró Gyöngyvér neveihez köthető. Tóth László az 1974-ben megvédett műszaki doktori értekezésében²⁵ összefoglalt műszerezett ütővizsgálatait (mintegy 1500 db. próbatesten) a VAKÚT-ban végezte 1972-73-ban, majd Miskolcon is megépítette a műszerezett ütőművet elsősorban az autóbuszok automata sebességváltóinak bórral mikro-ötözött, ZF típusú acéljainak minősítéséhez használt, a német Zanhadfabrik (a korábbi Zeppelin Művek, Friedrichshafen) Brugger-féle ütővizsgálatokhoz. Lenkeyné Bíró Gyöngyvér a '80-as évek végén, az első mikro-számítógépek megjelenésekor számítógéppel (C64-es) össze-kapcsolt rendszert hozott létre, majd a '90-es évek második felében a freiburgi Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik munkatársinak tapasztalatait felhasználó berendezést honosított meg²⁶. Ez mágneses vagy elektromissziós érzékelővel lehetővé tette a repedés megindulásának érzékelését berepesztett próbatesteknél is. A sugárkárosodás okozta elridegedés kimutatására az Atomenergia Kutató intézetben is kifejlesztésre került műszerezett ütőmű²⁷.

Az ütvehajlító vizsgálat történetéhez kötődően ugyancsak megemlítsre érdemes tény, hogy a bevezetés centenáriuma alkalmából André Pineau professzorral közösen nemzetközi konferenciát szerveztünk Poitiers-ben 2001. október 2-5. között²⁸. A kétkötetes kiadvány kiemelt előadásait megjelentette az ELSEVIER kiadó is²⁹.

Fábrý Zsigmond. Mindenképpen a kor egyik **szakmailag elismert ipari anyagvizsgáló** egyénisége. Sajnos életrajza sem a már említett Magyar Életrajzi Lexikonban, sem a História Tudós naptárban nem található. Némi adalékot szolgáltat a diósgyőri anyagvizsgálat történetének vázlatos bemutatása^{30, 31}. Mégis kiemelésre kerül Fábrý Zsigmond, annak több oka is van. Egyrészt ő állította össze az Anyagvizsgálók Közönyének első szakmai cikkét³², másrészt meghatározó egyénisége volt a méltán elismert diósgyőri anyagvizsgálat, metallográfia^{33,34} és hőkezelés^{35,36} szakmai megalapozásának azzal is, hogy ő volt az alapítója. Érdekességként említem meg, hogy hazánk első elektronmikroszkópját – ellenőrzendő ismereteim szerint – az akkor már Lenin Kohászati Művek Anyagvizsgáló laboratóriumában állították fel.

Edvy Illés Aladár. (nem tévesztendő össze a képzőművész dinasztiaival!). Gépészmérnök. Műegyetemi tanulmányait Budapesten, Münchenben és Aachenben végezte. 1876-tól a Ganz Gépgyárban kezdett dolgozni, Mechwart András rendkívüli hatással volt rá. 1882-től a budapesti állami ipariskolában a fém-vasipari osztály tanárává nevezték ki, majd felsőipariskolai igazgató volt. 1902-től a Kereskedelmi Minisztériumban az iparfejlesztő műszaki osztály vezetője. A műegyetemen Magyarország iparáról tartott előadásokat. Szerteágazó szakirodalmi munkássága közgazdasági, ipari, technológiai és

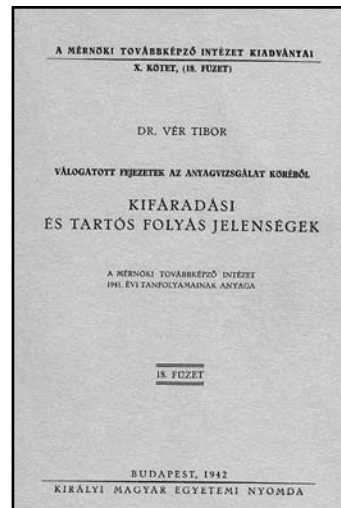
technikator-téti kérdésekre terjedt ki. Többek között nagy figyelmet szentelt a vasnak, a cinknek és az alumíniumnak. 1892–1917-ig a Magyar Mérnök és Építész Egylet Közönyének szerkesztője volt. Ő volt az, aki a párizsi világkiállításról beszámolván ismertette a Brinell-féle keménységmérést³⁸.

Vér Tibor. Trsztena, 1899. máj. 11. – Cincinnati, USA, 1957. nov. 30. Gépészmérnök, politikus. A budapesti műegyetemen gépészmérnöki oklevelet szerzett (1922). Vezető szerepe volt az I. világháborút követő jobboldali diákmozgalmakban. 1924–1936 között műegyetemi adjunktus, 1942–44-ben c. rk. tanár, 1937-től a budapesti Mérnöki Kamara alelnöke, 1942–44-ben elnöke. A Technológiai és Anyagvizsgáló Intézetet vezető Ordódy János miniszteri tanácsos állami szolgálatának betöltése után 1937. év augusztus 1-jével nyugdíjazását kérte és helyette Vér Tibor kapott igazgatói kinevezést. 1944-ben az Iparügyi Minisztérium államtitkára volt. 1944-ben Ausztriába távozott. 1957-ben kivándorolt az USA-ba. Szamai tevékenységét illetően folytatta a Rejtő Sándor által elindított kifaradási jelenségek vizsgálatát³⁸. Ezeket kiegészítette a kúszási folyamat elemzésével³⁹. A kifaradással és kúszással kapcsolatos eredményeket az e témában született első magyar nyelvű könyvben foglalja össze. A könyv címlapja a 9. ábrán látható. Ugyancsak érdekességként említhető meg, hogy a tanszék hagyományainak megfelelően Vér Tibor távozása után is jelentős figyelmet fordít a törési folyamatok tanulmányozásának⁴⁰.

Misángyi Vilmos (Pécs, 1880. jan. 8. – Teisbach, 1948. ápr. 19.): gépészmérnök, műegyetemi tanár. Tanulmányait a budapesti műegyetemen végezte 1903-ban. A maradandó alakváltozásokról⁴¹ c. értekezésével 1907-ben műszaki doktori oklevelet nyert. Mint MÁV főfelügyelőt hívták meg 1924-ben – Rejtő Sándor utódaként – a műegyetem Mechanikai Technológiai Tanszékére. 1927-től az Anyagvizsgálók Közönye szerkesztője volt. Számos tanulmánya és több önálló munkája jelent meg a hazai és külföldi szakajtóban. Az 1944–45-ös tanévben mint a műegyetem rektora a nyilas kormány utasítására a Műegyetemet nyugatra akarta telepíteni. Az emlékezetes tanácsülés 1944. november 28.-án volt. A tanári kar ellenállása miatt ez meghiúsult. Előbb Sopronba, majd az akkori Nyugat-Németországba távozott. A vele tartott hallgatók



8. ábra. Edvi Illés Aladár (Kapunvár, 1858. jan. 6. – Budapest, 1927. ápr. 24.



9. ábra. Az első magyar nyelvű könyv a kifaradásról és kúszásról

²⁴ Rittinger J.: V. Törésmechanikai Szeminárium kiadványa, 1995. 04. 3-6. p.238-245.

²⁵ Tóth L.: Hegeszthető szerkezeti acélok ridegedési hajlamának vizsgálata (1974)

²⁶ Lenkeyné B.Gy., Winkler S., Tóth L.: V. Törésmechanikai Szeminárium kiadványa, 1995. 04. 3-6. p.256-265.

²⁷ Uri G., Gillemot F., Gillemot L.: V. Törésmechanikai Szeminárium kiadványa, 1995. 04. 3-6. p. 251-255.

²⁸ CCC-2001 Charpy Centenary Conference, Poitiers, 2001. October 2-5., Volume I. p. 1-14.

²⁹ L.Tóth –H.-P. Rossmann –T.A. Siewert: Historical background and development of the Charpy test. From Charpy to Present Impact Testing –ELSEVIER, ESIS Publication 30, 2002. pp.3-19.

³⁰ Kovács K.: A diósgyőri anyagvizsgálat története. http://www.metalcontrol.hu/data/diosgyori_anyagvizsgalat_tortenete.pdf.

³¹ Kovács K.: Szemelvények a diósgyőri anyagvizsgálat történetéből. lásd [1] p.12-131,

³² Fábrý Zs.: A vas- és acélfajták melegkezelése. AK1914/1. p.5-15.

³³ Fábrý Zs.: 600-1000 °C közötti lágyított néhány karbon szerszámacél mechanikai tulajdonságainak és mikrostrukturájának változásai. BKL, 1917/50/1. p. 175-182.

³⁴ Fábrý Zs.: Forrasztott- és folytvassalak metallográfiai vizsgálata. BKL, 1918/51 p.167-171.

³⁵ Fábrý Zs.: A kazánlemezek lágyításának kérdése. BKL, 1935/68 p.290-292.

³⁶ Fábrý Zs.: A karbonacélok mechanikai tulajdonságainak változásáról, ha azokat 600-1000 °C közötti hőfoknál lágyítjuk. BKL, 1937/70. p.131-133.

³⁷ MÉEK, 1900/34. 1-12. p.327-332.

³⁸ MÉEK, 1930/7-12. p. 59-72. Vér T.: Az ismételt igénybevétel okozta törések keletkezése, kifejlődése és az azokat létrehozó feszültségek

³⁹ MÉEK, 1930/6/2. p. 1-22. Vér T.: A kazánlemezek betegségei.

⁴⁰ Vér T.: Die Bruchgefahr in Konstruktionen des Maschinenbaues, Technica (Svájc), 1954, X, XI és XII számal.

⁴¹ MÉEK, 1908/42/1-12. p.70-98. Misángyi V.: A maradandó alakváltozások.

Drezda bombázása során átélt megpróbáltatásairól számos könyv jelent meg^{42,43,44}.

Gállik István Dömötör (Budapest, 1866. márc. 2. – Budapest, 1945. ápr. 16.) Hídepítő mérnök. 1888-ban szerzett oklevelet a budapesti műegyetemen. 1888-1890 közt tanársegéd Khern Antal mellett, majd a földművelésügyi minisztériumban a vízrajzi osztály mérnöke. 1892 után a kereskedelemügyi minisztérium hídepítési osztályának munkatársa, majd 1918-tól 1925-ig vezetője. Mint kereskedelemügyi helyettes államtitkár vonult nyugalomba. Részt vett a budapesti Duna-hidak szerkezeti részének tervezésében, ezek építésében, valamint a Tisza-hidak és a Széchenyi-Lánchíd (1913-1916) újjáépítésében. Technikatörténeti vonatkozásban kiemelkedő a Duna- és Tisza-hidakkal foglalkozó, 1941-ben írott közleménye⁴⁵ Szakirodalmi munkásságában a hídepítéstan kérdései mellett elsősorban vas és acélszerkezeti anyagok szilárdsági vizsgálatának kérdéseivel foglalkozott. Ezek közül a kontrakció szerepének⁴⁶ jelentőségét emeli ki. Ugyancsak foglalkozik a nagyobb szilárdságú anyagok alkalmazhatóságával és minősítésének kérdéseivel⁴⁷. Mint már említésre került az anyagvizsgálók Nemzetközi Szervezetének brüsszeli kongresszusáról, annak a fémek vizsgálatára vonatkozó eseményeiről is Gállik István számolt egy 13 oldalnyi terjedelmű közleményben.

Schleicher Aladár (Zagyvapálfalva, 1880. júl. 12. – Budapest, 1962. szept. 28.): fémkohómérnök és metallográfus, a műszaki tudományok doktora (1952). Erdészeti Akadémián (Sopron) 1904-ben fémkohómérnöki oklevelet nyert, és ott tanársegédként működött 1906-ig, amikor a budapesti főfémjelző és fémbevaltó hivatalhoz helyezték át. 1910-ben a budapesti tudományegyetemen megszerezte a vegyészeti doktorátust, 1911-ben a charlottenburgi műegyetemen metallográfiai tanulmányokat folytatott. Az I. világháborúban a bécsi tüzérségi arzenál anyagvizsgáló laboratóriumát vezette. 1918-tól a budapesti főfémjelző és fémbevaltó hivatal vezetője volt. 1922-től az állami szolgálatból kiválva, tanácsadói magánmérnöki gyakorlatot folytatott. 1919-ben a budapesti műegyetemen a metallográfia magántanára, 1932-ben nyilvános rendes tanára, 1923-tól 1928-ig a soproni Bányászati és Erdészeti Főiskola meghívott előadója. A II. világháború idején és azt követően az iparügyi minisztériumban szakértő, 1946 – 1950 között a budapesti műszaki egyetemen metallográfiát adott elő. 1951-től a hazai szabványosításban is részt vett. Tudományos munkássága elsősorban a kész fémek és ötvözeik tanulmányozására terjedt ki. Számos tanulmánya jelent meg, egyebek közt a hazai fémkohászat történetéről is. 1951-től az MTA műszaki osztályának kiadásában megjelenő osztályközlemények, az Acta Technica és a Vaskohászati Enciklopédia szerkesztője volt. Nevéhez fűződik hazánk első metallográfia könyvének megjelenése is. Ennek címlapját szemlélíti a 10. ábra. Az OMBKE által kiadott könyv teljes terjedelmében megjelelt a BKL különböző számai-ban⁴⁸. A metallográfia vizsgálatok széleskörű hazai elterjedésében Czákó Miklós szerepe is meghatározó volt⁴⁹, de a már említett Rejtő Sándor

mellett a „hőskor” történelméhez Faller Károly is adalékokkal szolgált⁵⁰. A gyakorlati alkalmazás területéről Wolf Ottó adott egy rövid tájékoztatást⁵¹. Verő József volt, aki az 1940-es években rendszerbe foglalta a mikroszkopos fémvizsgálati módszereket. A 60 oldalas füzet címlapját a 11. ábra szemlélíti.

A meghatározó egyéniségek sorába tartozott Gillemot László professzor is, akinek különböző – így az anyagvizsgálati – irányú tevékenységeiről születésének centenáriuma-hoz kötődően bőséges információk kerültek összegyűjtésre, illetve az Anyagvizsgálók Lapjának jelen számában is terjedelmesen ismertetésre került a munkássága.

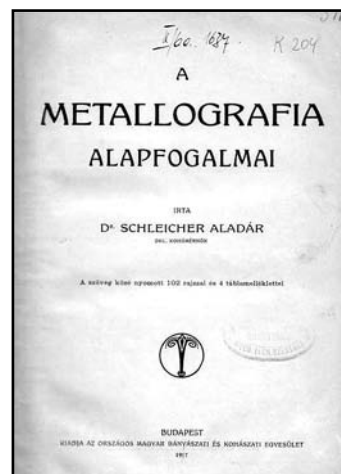
Egy további közleményben a Magyar Anyagvizsgálók Egyesületének tisztségviselőinek szakmai tevékenységére kívánok visszatérni.

Az anyagvizsgálathoz kötődő szabványosítás szerepét egyre inkább átveszi a nemzeti szabványosítási bizottságok, amelyek sorra alakulnak meg az egyes országokban. Hazánk e területen is az elsők között

van, hisz 1921. április 28-án megalakul a Magyar Mérnök- és Építészegylet keretében a Magyar Ipari Szabványosító Bizottság, amelynek Herman Miksa az elnöke és Kandó Kálmán az alelnöke. A nemzeti szabványosító bizottságok tevékenységét az „International Federation of the National Standardising Association- ISA” koordinálja. Hazánk e szervezetnek is tagja lesz 1934-ben. Szerepüket jól érzékelteti az a tény, hogy az ISA 1936. évi közgyűlését Budapesten tartják. Ennek részleteiről Misángyi Vilmos készít összefoglalást⁵². Az anyagok vizsgálatához kapcsolódó magyar szabványok folyamatosan jelennek meg, amelyekről az Anyagvizsgálók Közlönye rendszeresen tájékoztat.

Az Anyagvizsgálók Közlönye

A pezsgő szakmai élet nyilvánvalóan kikövetelte magának az írásbeliség megjelenését is, lehetővé téve ezzel, az eredmények szélesebb körű megismertetését. Az **Anyagvizsgálók Közlönyének 1914. június 25-én** megjelent első számában az elnök, **Rejtő Sándor** erről így ír: *“Folyó évi közgyűlésünkön (XVII. rendes Közgyűlés, 1914. április 25.)⁵³ kifejtettem, hogy egyesületünknek szellemi kapcsolatok létesítése céljából tudományos színvonalon álló szaklapra van szüksége, amelynek útján tagjaink a magyar tagok munkásságáról, valamint a külföldiek ez irányú tevékenységéről tájékoztatást nyernének, hogy eszmétársulás alapján a tudományt előbbre vihessék. Ez a szaklap gyakorlatban működő szaktársainkat a tudomány legújabb vívmányaival ismertetné meg, hogy azokat a gyakorlati életbe hosszasan előtanulmány*



10. ábra. Az első magyar nyelvű könyv a metallográfiáról



11. ábra. Verő József füzetének címlapja

⁴² Plasik M.: A műegyetemisták Odüsszeája, 1944-1946. Műegyetemi Kiadó,

⁴³ Hamvazószerda. Műegyetemisták a drezdai tűzviharban.

⁴⁴ Vonnegut K.: Az ötös számú vágóhíd.

⁴⁵ Gállik I.: Történelmi visszapiantás régebbi Dunahídjaink építésére. Technika, 1941/1. p. 13-56.

⁴⁶ MÉEK, 1909/43-9-10, p. 217-225. Gállik I.: A szakadási kontrakció jelentősége a vasanyagok minőségének megítélésében, különös tekintettel a képlékenységre.

⁴⁷ MÉEK, 1928/62/41-42, p. 285-290. Gállik I.: A nagyobb szilárdságú szerkezeti acélok kérdésének állása Magyarországon.

⁴⁸ BKL, 1915/48/2, p. 1-9, 43-45, 80-91, 113-121, 156-164 és 185, ill. 1917/50/2, p. 686-694, 809-830, 839-853.

⁴⁹ MÉEK, 1914/48/1-52. p. 361-369, 373-379, 387-392. Czákó M.: A metallográfia vizsgálati módszerei.

⁵⁰ BKL, 1903/36/1, p. 686-710. Faller K.: Tanulmányok a metallográfia terén.

⁵¹ BKL, 1912/45/2, p. 462-464. Wolf O.: Metallográfia a praxisban.

⁵² MÉEK, 1837/37/51-52. p. 364-376. Misángyi V.: A Szabványügyi Intézetek Nemzetközi Szövetségének Budapesten tartott értekezlete.

⁵³ a szerző megjegyzése

nélkül átvihessék s ezzel iparunk haladását és versenyképességét előmozdítsák”. **Miklósi Kornél** a lap szerkesztője. Még ugyanebben az évben ezt a feladatot Varga Bálint veszi át "hadbavonult" elődjétől^{54,55}. Előszavában a következőképpen fogalmaz: "Hazánk ipara elég nagy ahhoz, hogy az anyagvizsgálat problémáival behatóan foglalkozzunk, s mert ennek fejlődése s minden téren való érvényesülése kedvező befolyást gyakorol az iparra, azért azzal a kéréssel fordulok hazánk mérnökeihez, hogy a gyakorlati működésük folyamán talált eredményeket minél nagyobb számban engedjék át közlésre lapunknak, másrészt, hogy a külföldi irodalom újabb termékeit lapunkban ismertessék".

A fenti idézetekből több következtetésre is juthatunk. Az egyik nyilvánvalóan az, hogy 1914.-ben már 17. közgyűlését tarthatta a Magyar Anyagvizsgálók Egyesülete, amelynek megalakulása csupán két évvel követte az Anyagvizsgálók Nemzetközi Szervezetének létrehozását, azaz a hazai szakemberek szinte azonnal belátták a nemzetközi szakmai szervezet és az abban végzendő tevékenység fontosságát. Ezt a munkát alapvetően Rejtő Sándor fogta össze, aki 1889. május 13.-án rendkívüli tanár kinevezést kap a kir. József Műegyetemre. A német nyelvterületen akkor általánosan elfogadott mechanikai technológiák oktatásának felfuttatásával ettől az időponttól tekinthető önálló tanszéknek a Budapesti Műszaki Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszéke⁵⁶. Az anyagvizsgálat hazai jelentőségét fémjelzi, hogy az akkor még egyetlen műszaki ismereteket oktató egyetem, a kir. József Műegyetem, majd Budapesti Műszaki Egyetem három volt rektora – *Rejtő Sándor*, *Misángyi Vilmos* és *Gillemot László* – is szorosan kötődött az anyagvizsgálat tudományterületéhez, megteremtve ezzel e tudományterület súlyát az oktatásban is.

Az elnöki beköszöntőből levonható másik lényeges következtetés az, hogy iparunk fejlett volt hisz, mintegy kikövetelte a lap megjelenését. Az iparunk helyzetének elemzése helyett elegendő csupán, ha ma is jól ismert neveket és létesítményeket sorolunk fel: Bánki Donát (1859-1922) Pattantyús-Ábrahám Géza (1885-1956), Csonka János (1852-1939), Jendrassik György (1898-1954), Mechwart András (1834-1907), Zipernowsky Károly (1853-1942), Déry Miksa (1854-1938), Kandó Kálmán (1869-1931), Bláthy Ottó Titusz (1860-1939), a már említett és életének döntő hányadát külföldön, főképpen az USA-ban eltöltött Kármán Tódor (1881-1963), illetve Galamb József (1881-1955). És még hosszasan sorolhatnánk a napjainkban is ismerősen csengő neveket⁵⁷. Hasonló felsorolást adhatnánk azon létesítményekről is, amelyekben ma is gyönyörködhetünk (pl. a milleneumi földalatti, parlament épülete, múzeumok, pályaudvarok stb.).

Az Anyagvizsgálók Közlönyének megindítása és fenntartása természetesen a megfelelő anyagi háttér megteremtését igényelte. E forrásokról és azok felhasználásáról rendszeresen tájékozódhattak az olvasók a lapban. A lap indításához szükséges tőke előteremtése kapcsán Rejtő Sándor így ír „*En bennem azonban élt a hit, hogy Magyarországon a technikai tudományok tisztelete már általános és hogy az iparunk élén álló szakférfiak ismerik a tudománynak az iparra gyakorolt általános hatását és készek annak fejlődését még anyagi áldozatok árán is elősegíteni. Hitemben nem csalódtam.*” Ennek megfelelően 5150 korona gyűlt össze a lap indításához.

⁵⁴ lásd. az 1914. november 17.-én kelt Választmányi Ülés Jegyzőkönyvét. Anyagvizsgálók Közlöny. 1914. p. 125-128.

⁵⁵ Varga Bálint: Második évfolyamunk. Anyagvizsgálók Közlöny. 1915/1. p.1-2.

⁵⁶ Artinger I.: 100 éves a Mechanikai Technológiai Tanszék. Gép XLI. évf. 1989. 10. szám. p. 362-374.

⁵⁷

⁵⁸ Vietorisz József: A háborús gyorsacélokról. Anyagvizsgálók Közlöny. 1944/1. p.1-28.

⁵⁹ Zorkóczy Béla: A hegesztés technológiája és korszerű alkalmazásai. Anyagvizsgálók Közlöny. 1930. p.101-136.

⁶⁰ Springer István: A washingtoni National Bureau of Standards. Anyagvizsgálók Közlöny. 1933. p.160-168.

⁶¹ Sályi (Springer) István: A beton lassú alakváltozása. Anyagvizsgálók Közlöny. 1936/1. 1-34.

2. táblázat

Anyagvizsgálók Közlönyének megjelent számai (Kiadja a Magyar Anyagvizsgálók Egyesülete)

Évfolyam	Év	Számok
1	1914	1 – 5
2	1915	1 – 10
3	1916	1 – 10
4	1917	1 – 10
5	1918	1, 2 – 9, 10
6	1928	1 – 5
7	1929	1 – 3
8	1930	1 – 3
9	1931	1 – 4
10	1932	1 – 5
11	1933	1,2 – 9,10
12	1934	1 – 5
13	1935	1 – 5
14	1936	1 – 5
15	1937	1 – 5
16	1938	1 – 5
17	1939	1 – 5
18	1940	1 – 5
19	1941	1 – 5
20	1942	1 – 5
21	1943	1 – 5
22	1944	1

A hányatott sorsú lapnak összesen 22 évfolyama és 116 száma jelent meg (2. táblázat), miközben az első világháborút követően tíz évig szünetelt a kiadása (5. évfolyam 1918., 6. évfolyam 1928). A *Gillemot László felelős kiadó* nevével jegyzett utolsó szám 1944.-ben jelent meg, témája a kor igényeivel egyezően "A háborús gyors-acélok"⁵⁸ volt.

A lap szerkesztői feladatát a következő szakemberek látták el:

1914 – 1916 **Miklósi Kornél**
 1916 – 1918 **Varga Bálint**
 1918 – 1918 **Czakó Adolf**
 1928 – 1933 **Misángyi Vilmos** (1933/1 és /2 szám)
 1933 – 1939 **Czakó Miklós**
 1939 – 1942 **Jáky József** (1942/4.-ig)
 1942 – 1944 **Nemesdy József**

A közölt cikkeket áttekintve igen sok érdekes dolgot lehetne említeni azok közül, amelyek a *Rejtő Sándor* és *Miklósi Kornél* által a lap első számában megfogalmazott törekvéseknek a helyességét igazolják. Ezek közül néhányat az 3. táblázat emeltem ki. Ezeket követve igen jól érzékelhető, hogy hazánk mind az anyagvizsgálattal foglalkozó laboratóriumok, mind a szakmai szervezetek alakítása, mind a szabványosítás, mind pedig a szakmai színvonal tekintetében a világ élvonalába tartozott. A Miskolci Egyetem volt oktatói közül a Mechanikai Technológiai Tanszék volt vezetője *Zorkóczy Béla* (1898-1975) hegesztés témakörben⁵⁹1930-ban, *Sályi István* volt rektor és a Mechanikai Tanszék volt vezetője pedig 1933-ban a washingtoni National Bureau of Standards-ról írt, amelynek meglátogatását az 1931–32 évekre kapott Smith Jeremiás ösztöndíj tett lehetővé számára⁶⁰. Ugyancsak Sályi István publikál 1936-ban is, az 1935-ben benyújtott műszaki doktori értekezésének témaköréből,⁶¹ a beton lassú alakváltozásának sajátosságairól.

A lap – mint említettem – a II. világháború után nem jelent meg. Az anyagvizsgálathoz kapcsolódó kutatásokról, azok eredményeiről többnyire a GÉP című folyóirat hasábjain számoltak be szakembereink.

MECHANIKAI VIZSGÁLATOK

3. táblázat

Az anyagvizsgálat fejlődését elősegítő legfontosabb események

1495	Huzal szakítóvizsgálata	Leonardo da Vinci	1542–1519
1638	Befogott gerendák hajlítóvizsgálata	Galileo Galilei	1564–1642
1675	Rugók megnyúlásának vizsgálata	Robert E. Hooke	1635–1703
1660	Hajlított gerendák rugalmas alakváltozása	Emde Mariotte	1620–1684
1684	Hajlított gerendák alakjának matematikai leírása	Jacob Bernoulli I.	1654–1705
1696	Virtuális elmozdulás elvének definiálása	John Bernoulli	1667–1748
1738	Variációs elv megfogalmazása	Daniel Bernoulli	1700–1782
1744	Rugalmasan alakváltozó tartók alakjának leírása	Leonard Euler	1707–1783
1773	Hajlított gerendák terhelhetőségének számítása	Augustin Columb	1736-1806
1775	Terhelés-behajlás regisztrálása fagerendák hajlításánál	Francois Buffon	1707-1778
1781	Gőzgép szabadalom	James Watt	1736-1819
1788	Szisztematikus anyagvizsgálat 906 anyagon	Franz Carl Achard	1753-1821
1797	Teljes egészében vasból készült eszterga	Henry Maudslay	1771-1831
1807	Rugalmassági modulus definiálása	Thomas Young	1773-1829
1807	Gőzhajózás kezdete (1807. október 7)	Robert Fulton	1765-1815
1822	Mechanikai feszültség fogalmának definiálása	Augustin Cauchy	1789-1857
1825	Rendszeres vasúti közlekedés megindulása	George Stephenson	1781-1848
1829	Keresztirányú alakváltozás definiálása ($\mu=0.25$)	S.Denis Poisson	1781-1840
1835	Vasúti közlekedés megindulása Németországban		
1838	Első publikáció a kifáradás jelenségéről	Albert W.A	1787-1846
1846	Vasúti közlekedés megindulása hazánkban		
1852	Werder 100 tonnás szakítógépe	Ludwig Werder	1808-1885
1855	Bessemer acélgégyártás megindulása	Henry Bessemer	1813-1889
1856	Huzal elektromos ellenállása és a hosszának kapcsolata	Lord Kelvin	1824-1907
1856	A Német Mérnökök Egyesületének alapítása	május 12., Alexisbad	
1858	Első anyagvizsgáló laboratórium megnyitása	David Kirkaldy	1820-1897
1858	Wöhler publikációsorozatának kezdete	August Wöhler	1819-1914
1864	Simens-Martin acélgégyártás megindulása	Siemens fivérek	1816-1904
1864	Metallográfia vizsgálatok megindulása	Henry Clifton Sorby	1826-1908
1867	Magyar Mérnök- és Építészegylet Közlönye		
1868	Bányászati és Kohászati Lapok		
1871	Mech. Technológiai Laboratórium Münchenben	Johann Bauschinger	1834-1893
1873	Mech. Technológiai Laboratórium Bécsben	Karl von Jenny	1819-1893
1874	Anyagvizsgáló Intézet Budapesten	Pilch Ágoston	
1876	A sínef keménységének meghatározására szolgáló esési készülék és mérőeszköz⁶²	Glück Bernát	
1877	Thomas acélgégyártás megindulása	S. Glichirst Thomas	1850-1885
1879	Anyagvizsgáló Intézet Zürichben	Ludwig von Tetmajer	1850-1905
1880	Martens 200-szoros nagyítású mikroszkópja	Adolf Martens	1850-1914
1883	Piezoelektromos jelenség felfedezése	Pierre Curie	1859-1906
1883	M.kir. Technológiai és Anyavizsgáló Intézet⁶³	alapító: Trofort Ágoston	Június 24.
1884	Első Bauschinger konferencia Münchenben		
1886	Martens tükrös finomnyúlás-mérése	Adolf Martens	1850-1914
1887	Maradó feszültségek mérése anyagleválasztással	N. Kalakutzky	
1889	Mechanikai Technológiai Tanszék, Budapest	Rejtő Sándor	1853-1928
1891	Cementlaboratórium Budapesten		
1894	Kísérleti Állomás (szolgáltató laboratórium)		
1895	Anyagvizsgálók Nemzetközi Egyesületének megalakítása, Zürichben	Elnök: L.Tetmajer	1850-1905
1896	Német Anyagvizsgáló Egyesület megalakulása	Elnök:A. Martens	1850-1914
1896	Röntgensugárzás felfedezése	W. Conrad Röntgen	1845-1923
1897	A Magyar Anyagvizsgálók Egyesületének megalakulása, június 16.	Elnök: Czigler Győző	1897-1904
1900	Brinell keménységmérés	Johan Agust Brinell	1849-1925
1900	A Brinell-féle szilárdsági kísérletek⁶⁴	Edvi Illés Aladár	1858-1927
1900	Valódi nyúlás fogalmának bevezetése	Augustin Mesnager	
1901	Útővizsgálat bevezetése	George Charpy	1865-1945
1901	British Engineering Standard Association		

⁶² Magyar Mérnök és Építészegylet Közlönye 1876. p.464.

⁶³ A m. kir. Technológiai és Anyagvizsgáló Intézet 50 éves jubileuma. Anyagvizsgálók Közlönye. 1933. p. 99-100.

⁶⁴ Magyar Mérnök és Építészegylet Közlönye 1900. p.327-332.

3. táblázat folytatása

Az anyagvizsgálat fejlődését elősegítő legfontosabb események

1904	Acélok alsó- és felső folyási határa	Carl von Bach	1847-1931
1907	Feszültségeloszlás éles bemetszés csúcsánál	Karl Wieghard	1874-1923
1908	Rockwell keménységmérés	Stanley P. Rockwell	
1910	Háromtengelyű nyomással a márvány is képlékeny ⁶⁵	Kármán Tódor	1881-1963
1911	M. kir. Ipari Kísérleti Anyagvizsgáló Intézet	(július)	Budafok, Gyár u. 15.
1912	Székesfővárosi anyagvizsgáló állomás	Soroksári u. 31.	
1912	Mélyhúzóhatósági vizsgálat szabadalma	Abraham Erichsen	
1912	Rozsdamentes acél előállítás (Krupp művek)		
1912	Röntgen-finomszerkezet vizsgálat bevezetése	Max von Laue	1879-1960
1914	Anyagvizsgálók Közlönyének megjelenése	Szerkesztő: Miklósi B.	
1915	A bemetszett rudak hajlító ütépróbája ⁶⁶	Bartel János	1862-1945
1917	A Röntgensugarak alkalmazása az anyagvizsgálatban ⁶⁷	Kapus László	
1917	Deutsches Institut für Normenanschluss (DIN)		
1918	American Standards Association		
1918	Shore keménységmérés	A.F. Shore	
1919	Kúszásvizsgálatok megkezdése	P. Chevenard	
1920	Repedést tartalmazó rideg anyagok szilárdsága	A.A. Griffith	1893-1963
1921	Magyar Ipari Szabványosító Bizottság megalakulása	Elnök: Herrmann Miksa	
1924	Károsodások halmozódásának elmélete	A. Palmgren	
1925	Vickers keménységmérés	Smith R., Sanland E.	
1926	Association Francaise de Normalisation		
1928	Sima szakítópróbatest törése középről indul	Paul Ludwik	1838-1934
1928	Anyagvizsgálók Új Nemzetközi Szövetségének	elnök: A. Menager	január 5.
1929	Az ultrahangvizsgálat szabadalmaztatása	S.J. Sokolov	
1930	Kúszásvizsgálat kéttengelyű terheléssel	R.W. Bailey	
1931	Szerkezeti vasanyagok viselkedése magasabb hőmérsékleteken állandó (statikus) terhelések alatt ⁶⁸	Vér Tibor	
1931	Maradófeszültség számítás rétegmaratása után	N.N. Davidenkov	1879-1962
1931	Anyagvizsgálók Új Nemzetközi Szövetségének első kongresszusa Zürichben	szeptember 11-16.	
1932	I. Nemzetközi Hegesztéstechnikai Konferencia, Hága ⁶⁹		
1934	Mágneses repedésvizsgálat elve	Walter Gerhard	
1935	A fotoelaszticitás. Feszültségmeghatározás optikai úton ⁷⁰	Vásárhelyi Dezső	
1937	Automatikus repedésvizsgáló készülék	Friedrich Förster	
1939	Nyúlásmérő bélyeg készítése	E. Simons, A. Ruge	
1940	Bemetszett rudak és szegecselt kötések fáradási szilárdsága ⁷¹	Gállik István	
1941	"Szerkezeti szilárdság" fogalmának bevezetése Ernst Gaßner		
1941	A hegesztés röntgenvizsgálata ⁷²	Gillemot László	1912-1977
1944	Anyagvizsgálók Közlönyének utolsó száma		
1960	Elektrohidraulikus zárt vezérlésű anyagvizsg. berend.		
1964	Analóg számítógéppel vezérelt anyagvizsg. berend.	Phil Mast	
1967	MTS automatikus szervo-hidraulikus anyagv. berend.		
1970	Az első törésmechanikai vizsgálati szabvány (E 399-70)		
1983	A fáradásos repedésterjedés vizsgálati szabványa (E647-83)		
1986	Az RS232/V24 alkalmazása az ultrahangos vizsgálatban		
1991	Anyagvizsgálók Lapja megjelenése		
1994	Az első beépített DVM diagram az ultrahangos készülékben		

⁶⁵ Magyar Mérnök és Építészegylet Közlönye 1910. p.212-226. (Mitől függ az anyag igénybevétele?)

⁶⁶ Anyagvizsgálók Közlönye. 1915. 1.szám.p.3-28. és 1915. 2.szám 33-52.

⁶⁷ Anyagvizsgálók Közlönye. 1917. 7-8. Szám. p.202-227.

⁶⁸ Anyagvizsgálók Közlönye. 1931. p.179-220.

⁶⁹ Beszámolót készítette: Zorkóczy Béla (Anyagvizsgálók Közlönye. 1932. p.1-37)

⁷⁰ Anyagvizsgálók Közlönye. 1935. p.161-177.

⁷¹ Anyagvizsgálók Közlönye.p.1-28 és 33-62.

⁷² Anyagvizsgálók Közlönye. 1941. p.85-164

Ezekről ad rövid áttekintést dr. Lehofer Kornél. A hazai anyagvizsgáló szakemberek számára új lap e témakörben csupán 1991-ben jelent meg újból, az anyagvizsgáló eszközöket forgalmazó TESTOR Bt. kiadásában. A negyedévenként napvilágot látó lap első számának előszavában a kiadó vezetője, Szappanos György így ír: „Nem öncélú publicisztikák gyűjteményét kívánjuk kiadni, hanem gyakorlati tapasztalatokat közvetíteni és feladatok vizsgálati megoldásainak sok kísérletezéssel megszerzett know-how-ját átadni. Szeretnénk írásos fóruma lenni annak, hogy megtalálják egymást az azonos feladatokkal foglalkozó kollégák”.

Érdemes összevetni a két – az 1914-ben és a 77 évvel később megjelent – bevezetőt. Mindkettő az anyagvizsgálattal, annak gyakorlati alkalmazásával foglalkozó hazai szakembereknek kíván fórumot adni. Ezen tevékenység megindulásához pedig igen jelentősen járult hozzá TETMAJER Lajos, aki nemzetközi tevékenysége, tekintélye folytán sokat tett azért, hogy szakembereink időben felkerüljenek arra a „közös nemzetközi hajóra”, amelyet anyagvizsgálóknak nevezünk.

Az alapvető emberi törekvéshöz – a környező világunk megismeréséhez vezető egyik ösvény, az anyagvizsgálat tudományterületének szervezett formában való megjelenésének centenáriuma alkalmából kívánunk kellő emléket állítani azzal, hogy emlékülést rendezünk Miskolcon 1997. október 6.-án és ezen alkalommal a résztvevők megkapták az Anyagvizsgálók Közlönye, Gép és Anyagvizsgálók Lapja c. folyóiratokban publikált közlemények bibliográfiai adatait és az ezekben való eligazodást nagymértékben segítő szoftvert.

Összefoglalás

Az anyagok tulajdonságainak jellemzésével kapcsolatos vizsgálati módszereket, azok kialakulását és fejlődését áttekintve a következő megállapítások tehetők:

Az ipari forradalom térhódítása magával hozta az anyagok (elsősorban a fémek) fejlesztésének és tömeges minősítésének fontosságát, így kikényszerítette a vizsgálati módszerek fejlesztését és egységesítését.

Ennek érdekében a szakemberek mind nemzetközileg, mind pedig hazailag koordinált szervezetekben tömörültek Így alakult meg 1895-ben az Anyagvizsgálók Nemzetközi Szervezete Tetmajer Lajos, és a Magyar Anyagvizsgálók Egyesülete Czigler Győző vezetésével.

A fémek vizsgálata területén a Műegyetem (és annak jogutódai) Mechanikai Technológiai Tanszék munkatársai történelmileg is mindig meghatározó szerepet töltek be Rejtő Sándortól kezdődően Gillemot Lászlón keresztül napjainkig. Mellettük felnőttek olyan generációk is, amelyek a Vasipari Kutató Intézetben, a Miskolci Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszékén, a FÉMKÚT-ban és a különböző ipari kutatóintézetekben, üzemekben (LKM, Dunaújváros, Salgótarján, Ózd, Csepel, RÁBA, stb.) fejtették ki tevékenységüket.

E történeti áttekintés során gyűjtött anyagok hívták fel a figyelmet arra, hogy célszerű a meghatározó anyagvizsgáló laboratóriumok történetével foglalkozó anyagainak összegyűjtése és publikálása annak érdekében, hogy ismeretink megújítható legyen. Az ilyen típusú közleményeknek szívesen ad helyet az Anyagvizsgálók Lapja.

Irodalomjegyzék

- [1] Tóth L.: Emlékülés a Magyar Anyagvizsgálók Egyesület alapításának 100. évfordulójára. Miskolc, 1997. október 6. kiadó: Miskolci Akadémiai Bizottság, Bay Zoltán Alapítvány. 368 p.
- [2] Lehofer K.: Emlékülés a Magyar Anyagvizsgálók Egyesület alapításának 100. évfordulójára. Miskolc, 1997. október 6. p.18-96.
- [3] Lehofer K.: A honi anyagvizsgálat rövid története. Anyagvizsgálók Lapja, 1997/3. p.61-71.
- [4] Tóth L., Rossmann H.P.: A törésmechanika és az anyagvizsgálat története. lásd: <http://mek.oszk.hu/01100/01191/>
- [5] L.Tóth –H.-P. Rossmann –T.A. Siewert: Historical background and development of the Charpy test. From Charpy to Present Impact Testing –ELSEVIER, ESIS Publication 30, 2002. pp.3-19.
- [6] Tóth L., Drótos L.: Az anyagtudomány és az anyagvizsgálat, mint az ipari forradalom eszköze és hajtóereje. Tanulmányok a természettudományok, a technika és az orvoslás történetéből. MTESZ, 2009.p.69-74.
- [7] Vasúti Lexikon A-tól Z-ig. Főszerkesztő: Urbán Lajos. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1991.
- [8] Tetmajer-Emlékülés az Anyagvizsgálók Nemzetközi Szervezete alapításának Centenáriumára alkalmából. Miskolc, 1995. december 19. 89 p.
- [9] Gállik István: A fémek vizsgálata a brüsszeli kongresszuson. Magyar Mérnök- és Építész Egylet Közleményei, XLII. kötet V-VI füzet. p. 127-139.
- [10] Sobó Jenő, Barlai Béla: Anyagvizsgálók nemzetközi kongresszusa Koppenhágában. Bányászati és Kohászati Lapok, 43 évf.1910. I. köt.ő.68-107.
- [11] Rejtő Sándor: Az anyagvizsgálók nemzetközi szövetségének New-Yorkban tartott kongresszusáról. Magyar Mérnök- és Építész Egylet Közleményei, XLVIII. kötet, 28. szám. 1913. p. 481-488.
- [12] Czako Adolf: Az Anyagvizsgálók 1927. évi nemzetközi kongresszusa Amszterdamban. Anyagvizsgálók Közönye. 1928 p.10-13.
- [13] Műszaki nagyjaink. GTE Kiadás 1-6. kötet.

A törésmechanika modelljei és gyakorlati alkalmazásai

Tóth László¹

Bevezetés

Kezdjük talán az alapkérdéssel! Miért is íratattott meg ez a közlemény? Más szavakkal fogalmazva: mit kaphat a Tisztelt Olvasó, ha rászánja idejét arra, hogy figyelmesen végigolvassa e cikket? Egyik lehetséges válasz az, hogy szakmai információkhoz jut! Nem, ez nem volt a célom, hiszen napjainkban információhoz való jutáshoz csupán az INTERNET-hez kell leülni. Maradván a „törésmechanika” címszónál, pl. a google keresőmotort használva 0,22 sec alatt 3920 találatot kaptam. Az angol „fracture mechanics” beírásával 0,26 sec alatt a találatok száma 3.520.000! A közlemény célja tehát nem az információforrás bővítése.

Alapvető célként a következők sarkalltak a közlemény megírására:

- a törésmechanika fogalmának elhelyezése a szilárd testek kontinuummechanikájának rendszerében,
- a gyakorló mérnöki társadalom számára bemutatni a törésmechanikai szemléletmód kialakulásának folyamatát, nehézségeit és egyre gyarapodó alkalmazási lehetőségeit,
- állást foglalni a törésmechanikai szemléletmód gyakorlati alkalmazási lehetőségeiben, gazdasági jelentőségében, a rendelkezésre álló modellek figyelembevételével.

Mit is takar a „**törésmechanika**” fogalma? Tudom sokan megdöbbenek e mondaton, de tisztelettel kérem az Olvasót válaszolnia meg a kérdést annak érdekében, hogy a törésmechanikát művelők hazai népes tábora megtalálja a közös alapot, a közös hangot! A saját értelmezésemben a **törésmechanika** a **kontinuummechanika** része, amely a **repedésszerű hibákat tartalmazó szilárd testek külső hatására bekövetkező várható viselkedését tárgyalja**. Ha ez a definíció elfogadható, akkor a törésmechanikai tárgyalásmód mindenképpen két mozzanatot foglal magába:

1. A repedéscsúcs környezetében **kialakuló mezők** (alakváltozásai, feszültségi, energetikai) leírásának modelljeit.
2. A repedés **stabilitási kritériumait** attól függően, hogy milyen modellt alkalmaztunk a mező leírására. E kritériumok feszültségi, alakváltozási vagy energetikai jellegűek lehetnek, amelyek közül az első kettő irányfüggő, az energetikai pedig skalármennyiség.

Az előzőkből egyértelműen következik az, hogy [1]

- maga a mechanika, a fizika része, amely
- modelleket vezet be, és
- kontinuum formában tárgyalja a jelenségeket, ahol
- a kontinuum vagy a kontinuumelem (tömegpont, anyagi pont, tömegelem) maga koordinátáfületekkel határolt (pl. az úgynevezett kiskocka), amely lehet homogén vagy heterogén, izotróp vagy anizotróp, és
- az anyag maga a geometriai teret folytonosan tölti ki, amelynek
- (tehát az anyag) állapotát, állapotának változásait leíró tenzorfüggvények a hely- és idő olyan függvényei, amelyek véges számú belső felülettől eltekintve deriváltjaival együtt folytonosak, és
- az anyag állapotának leírása kapcsán mindig van
 - kiinduló ($t=t_0$ időpontra) jellemző állapot és
 - a pillanatnyi (t) állapotra jellemző állapot, miközben
- a két állapot közötti átmenet leírható a vonatkoztatási koordináta-

rendszerben, amely lehet derékszögű (Descartes-i) vagy görbevonalú, és

- e koordinátarendszerek vonatkoztatási pontjai a következők lehetnek:

- a geometriai tér (álló) pontjai (Euler-féle tárgyalási mód)
- a kontinuum mozgó pontjai
- materiális mozgó pontok (a kontinuum mozgó anyagi pontjai).

A kontinuum viselkedésének jellemzése kapcsán vannak általánosan érvényesülő szabályok, az úgynevezett alaptörvények. Ezek a következők:

- Tömegmegmaradás (kontinuitási) törvény
- Mozgásegyenletek
 - Impulzus idő szerinti deriváltja $=$ a rá ható külső erők összegével
 - Egy tetszőleges pontra számított impulzusnyomaték idő szerinti deriváltja $=$ külső erők nyomatékával,
- Virtuális munka és virtuális teljesítmény elve
- Termodinamika I. főtétele (a rendszer energianövekménye a beáramlott hőmennyiség és a rendszeren végzett munka összege)
- Termodinamika II. főtétele (a rendszerből kinyerhető munka).

A felsorolt alapegyenletekben 20 ismeretlen szerepel, miközben az egyenletek száma csupán 9. Ebből adódóan ANYAGTÖRVÉNYEK-et kell konstruálni, amelyek a termodinamika I. vagy II. főtételére, vagy axiómákra alapozottak.

Miért kellett mindezt előre bocsátani? Azért, hogy egyértelműen megkülönböztethető legyen a

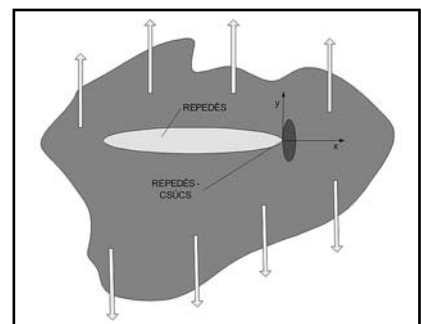
- a törés matematikai elmélete, és
- a törés mérnöki szemlélete.

Mindkét esetben **modell** kell alkotni a törés folyamatának leírására. A modell megalkotásához tekintsük az 1. és 2. ábrákon látható vázlatokat. Ha egy szilárd testben repedésszerű hiba van és ezt a testet külső hatás éri, akkor a repedés csúcsa előtt keletkezik egy olyan tartomány („az élet és halál mezsgyéje”), amelyben a következő folyamatok játszódhatnak le:

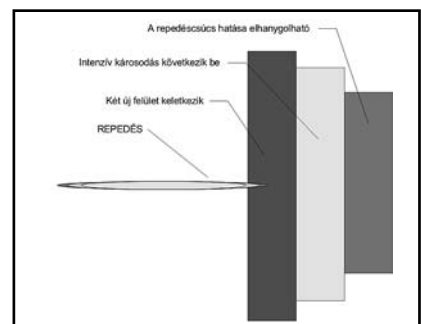
- nagyon intenzív károsodás, amelynek jellemzője a kialakuló mezők nagy gradiensei (ezt szemlélteti a 2. ábra),

- az anyagra és állapotára jellemző kritikus értékű károsodásnál a lokális törés következik be, amelynek jellemzője a repedésfelület növekedése, azaz új repedésfelületek keletkezése, a korábban egyszerűen összefüggő anyagi tartományban kétszeresen összefüggővé válik.

A jelenlegi ismere-



1. ábra. A repedéscsúcs környezete



2. ábra. A repedéscsúcs környezetének károsodása

¹ Tudományok doktora, egyetemi tanár, Debreceni Egyetem, Miskolci Egyetem, Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft. Logisztikai és Gyártástechnikai Intézet (BAY-LOGI)

teink alapján kijelenthető, hogy pillanatnyilag nem áll rendelkezésünkre olyan modell, amely lehetővé tenné azt, hogy akár a kontinuummechanika szintjén, egzakt matematikai eszközrendszerrel is leírhatók legyenek az anyagban az „élet-halál mezsgyéjén” lejátszódó folyamatok. Ebből adódóan közelítésekhez kell fordulnunk, kisebb-nagyobb elhanyagolással, modellek alkotásával kell élnünk, annak érdekében, hogy a közelebb juthassunk a repedésszerű hibákat tartalmazó mérnöki szerkezetek biztonságának megítéléséhez.

Szigorú értelemben véve tehát a „törésmechanika” kifejezés a törés matematikai elméletén nyugszik. Az első igazán nagyszabású kézikönyvsorozat, az 1968-ban Liebowitz professzor szerkesztésében „Fracture an advanced treatise” címmel megjelentetett munkában J. Rice az orosz kiadás 2. kötetének 3. fejezetében a „matematikai módszerek a törésmechanikában” címmel foglalja össze a törésmechanikai modelleket. Kevésbé következetes szemléletmód esetén a „törésmechanika” kifejezés magába foglalja mind a törés matematikai elméletét mind a mérnöki szemléletet is, amelyből számos félreértés adódhat a gyakorlati alkalmazások, alkalmazhatóságok kapcsán, különösen ez elméleti szakemberek és alkalmazói, mérnöki tevékenységet folytatók között.

E közleményben törekszem a két szemlélet következetes szétválasztására a következő bontásban:

1. Törésmechanika, a törés matematikai elméletének kialakulása, modelljei
 - a) A kontinuummechanika és a klasszikus energetikai személet (Griffith, Orowan, Irwin) kialakulása, fejlődése
 - b) A lineáris rugalmas törésmechanika kialakulása, fejlődése
 - c) A repedéscsúcs modellek (Barenblatt, Panasyuk, Dugdale)
 - d) A J-integrál
2. A törésmechanika mérnöki módszerei
 - a) A fajlagos repedésterjesztési erő koncepciója
 - b) Fajlagos törésmunka koncepciója
 - c) Biztonsági diagram típusú koncepciók (R6, SINTAP, FITNET, stb.)
3. Anyagok repedésterjedéssel szembeni ellenállásának kísérleti meghatározása
4. Melyik modellt válasszam?

Törésmechanika, a törés matematikai elméletének kialakulása, modelljei

1.a. A kontinuummechanika és a klasszikus energetikai személet (Griffith, Orowan, Irwin) kialakulása, fejlődése

E szemléletmód, mint a kontinuummechanika része - nem lehet független magától a mechanika, a szilárdságtan fejlődésétől. Ebben az első lépést a 3. ábrán látható **Augustin Louis CAUCHY** tette meg a Párizsi Akadémián 1822. szeptember 30-án tartott előadásában. Több mint 150 évnek kellett eltelténie ahhoz, hogy a törésmechanika, a repedésszerű hibákat tartalmazó szerkezetek megbízhatóságának megítélésére alkalmas módszerek a Royal Society plénumán megjelenjen. Erre 1979-ben került sor „Fracture Mechanics in Design and Service –



3. ábra.
Augustin Louis Cauchy
(1789.08.21.–1857.05.23 [2])

Living with Defects” címmel. Visszatérve Cauchy tevékenységére [2] akinek nevét a matematika számos területe őrzi napjainkban is, ő volt az aki a rugalmasságtan elméletének kidolgozója volt. Ezen elmélet két egymástól független rugalmas anyagjellemző nyugszik. A több mint 700 közleményt publikáló Cauchy-t a fiatalon elhunyt kortársa, **Nils Henrik Abel** (Ábel függvények, a matematikai „Nobel-díj” névadója) jellemzett így „...Cauchy örült, és ez ellen semmit nem lehet tenni. De ma ő az egyetlen ember a világon, aki igazán ért a matematikához...”

A mechanikai modellalkotás második lépését a 4. ábrán látható **Siméon-Denis POISSON** tette meg azzal, hogy 1829-ben definiálta a rugalmasságtan második anyagjellemzőjét, a keresztirányú és a hosszirányú megnyúlások hányadosát, a Poisson – tényezőt [2]. A több mint 400 publikációt írt Poisson életében gyakran hangoztatta, hogy „Az élet csak két dologra jó: matematikát kutatni és matematikát tanítani...”

Az 5. ábrán látható **Gabriel Lamé** volt az, aki első alkalommal vállalkozott arra 1852-ben, hogy a kontinuummechanikai ismereteket „Leçons sur la théorie mathématique de l'élasticité des corps solides” címmel könyv formában is összefoglalja [2].

A 6. ábrán látható **Adhémar Jean Claude Barré de Saint-Venant** a kontinuummechanikát számos, napjainkban is helytálló tétellel, eredménnyel gazdagította. Ezek többek között a következők:

- A Cauchy-féle feszültségfogalom pontosítása,
- a Poisson tényező fogalmának bevezetése a rugalmasságtanba,
- a lokális hatások elve (a Saint Venant elv, 1855), azaz lokális hatások csak kis tartományban befolyásolják a kialakuló mezőket, a lokális hatások környezetében a mezők gradiense igen nagy (az a repedésszerű hibák környezetébe is igaz).

A **Gabriel Lamé** által összeállított első szilárdságtani könyv még nem tartalmazta azon ismereteket, amely a határállapotokra, így a rugalmasságtan határállapotára, a folyás megindulásának feltételeire vonatkozhat. A világ vasúthálózata ebben az időszakban évi 15–20.000 km-rel növekedett. Ezekhez megfelelő és stabil töltéseket kellett építeni. Ezek tudatos tervezésében elengedhetetlen voltak a talajmechanikai ismeretek. A Hannoveri Királyi Vasúti Társaság építésügyi tanácsosa, **Christian Otto Mohr**, 7. ábra, aki élete folyamán Stuttgartban és Drezdában is tanított [2], egyrészt a különböző feszültségek ábrázolására bevezette a ma is használatos „Mohr-köröket”, másrészt a talajmechanikában bevezette a folyási kritériumot 1882-ben.

Innen már csak „egy lépés” volt a folyási kritérium általánosítása egyéb anyagra. Ezt **Huber-Mises-Henky** kritériumként emlegeti a szakirodalom. Először az építésmérnöki képzettségű **Maximilian Titusz HUBER**, 8. ábra, a Lembergi Műszaki Egyetem tanára volt az, aki 1904-ben írt disszertációjában a torzulási² ener-

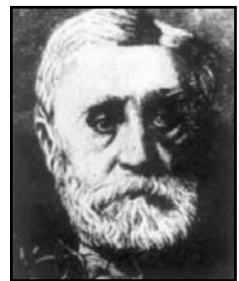
² Minden alakváltozási (feszültségi) tenzor felbontható a tisztán térfogatváltozást és a tisztán torzulást reprezentáló tenzorok összegére. Ezekből a torzulási energia számítható.



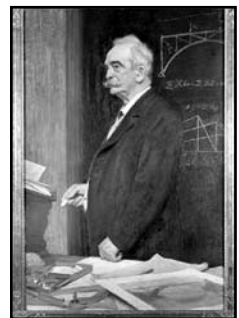
4. ábra. Siméon-Denis POISSON (1781.06.21. – 1840.04.25.) [2]



5. ábra. Gabriel LAMÉ (1795.07.22. – 1870.05.01.) [2]



6. ábra. Adhémar Jean Claude Barré de Saint-Venant (1797.08.23. – 1886.01.02.) [2]



7. ábra. Christian Otto MOHR (1835.10.08. – 1918.10.02.) [2]



8. ábra. Maximilian Titusz HUBER (1872.01.04. – 1950.12.09.) [2]



9. ábra. Richard von MIESES (1883.04.19.–1953. 07.14.) [2]



10. ábra. Henrich HENCKY (1885.11.12.–1951. 07.06.) [2]



11. ábra. Karl WIEGHARD (1874.06.21.–1924. 06.10.) [3]

energiamérlegéből indult ki. Ezek szerint amennyiben egy V térfogatú, F felületű (beleértve a repedés felületét is), a hosszúságú repedést tartalmazó rugalmas testet a felületén külső terhelés éri, akkor az energiamegmarást a következő összefüggéssel fejezhetjük ki [4]:

$$\int_F \sigma_{ij} n_j d\Omega = \dot{U} - \dot{T}S + 2\dot{a}\dot{F} \quad (1)$$

ahol a

σ_{ij} , a felületen ható külső terhelés hatására a testben ébredő rugalmas feszültségi tenzor komponensei, az u_i , a felület (beleértve a repedés felületét is) pontjainak elmozdulás-vektora, az n_j , a felület adott pontjának normálisa, az U , a test belső energiája, a T és S a test hőmérséklete és entrópiája, a γ , az egységnyi új felület létrehozásához szükséges energia, a

• felső pont pedig az időegység alatt bekövetkező változásra utal, az idő szerinti jelenti.



12. ábra. Alan Arnold Griffith (1893.06.13.–1960.10.13.) [2, 3]

giára alapozott folyási kritériumot. A dél-lengyelországi településen született, Lvovi (mert később ezt a nevet kapta Lemberg) Műszaki Egyetem rektoraként (1922–23) dolgozó, később Gdanskban Műszaki Egyetemet alapító szakember ilyen irányú feltételezését a Lembergben 1883. április 19. született és Bostonban 1953. 07. 14.-én elhunyt matematikusi, fizikusi és mérnöki beállítottságú **Richard Edler von Mises**, 9. ábra, ugyancsak megfogalmazta Huberttől függetlenül. Az orosz nyelvterületen, Hollandiában és az USA-ban (MIT) sokat tevékenykedő (és ezért a II. világháború kapcsán zaklatott életű), bajorországi kisvárosban, Ansnsbachban 1885. 11.02.-án született **Henrich Henky**, 10. ábra, 1923-ban Hollandiában megjelent közleményében ugyancsak a torzulási energiára alapozta a képlékeny folyás megindulásának feltételrendszerét.

A mintegy 80 év alatt kifejlesztett kontinuummechanikai eszközrendszer törésmechanikai alkalmazásában az első lépést **Karl WIEGHARD**, 11. ábra, tette meg 1907-ben, a szilárd testek hasításáról írt munkájában. Kimutatta, hogy az éles bemetszések csúcsának környezetében a rugalmasságtani számítások alapján az anyagban ébredő feszültségeknek $1/\sqrt{\rho}$ típusú szingularitása lép fel, ahol ρ – a bemetszés csúcsától mért távolság. Ez azt jelenti, hogy közvetlenül a csúcsban végtelen nagyságú feszültség ébred, akár már a legkisebb terhelés esetén is! E közelítőmód az alkalmazott matematikai eszközrendszer tekintetében teljes mértékben korrekt, de az anyag, amelyben a repedés van, biztosan nem viseli el!! Ez egy olyan ellentmondás, amelyet fel kell oldani valamilyen megfontolásokkal!

Teljesen új megközelítéssel közeledett a mai értelemben vett törésmechanikához a gépészmérnöki végzettségű **Alan Arnold Griffith**, 12. ábra, aki a szilárd testek

Az (1) összefüggést ki kell azzal egészíteni, hogy a repedés terjedés folyamata nem megfordítható, nem reverzibilis, hanem irreverzibilis folyamat, azaz

$$\dot{F} \geq 0 \quad (2)$$

Ezen általános elvből kiindulva a terhelés hatására bekövetkező hőmérsékletváltozás és entrópia növekedés elhanyagolásával jutott Griffith arra a következtetésre, hogy rideg anyagoknál adott a repedés-hossznál a törést okozó, a repedésfelületre merőleges feszültség a következő összefüggéssel számítható:

$$\sigma_{krit} = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a}} \quad (3)$$

ahol az

E , a rugalmassági, vagy Young modulus

γ , az egységnyi új felület létrehozásához szükséges energia.

Gondolatmenete követhető a 14.–16. ábrákon látható vázlatok alapján. A 14. ábra szerint az egységnyi vastagságú lemezben, a s húzó terhelés hatására felhalmozott rugalmas energia

$$U_{növekedés} = E\varepsilon^2/2 = \sigma^2/2E \quad (4)$$

Ha a test megreped és „ a ” hosszúságú repedést tartalmaz, akkor a repedés bizonyos környezete nem képes rugalmas energiát tárolni. Ezen terület magassága legyen arányos a repedés hosszával, ahogyan ezt a 15. ábra szemlélteti. Az energia csökkenés mértéke ekkor a $b@p$ feltételezésével

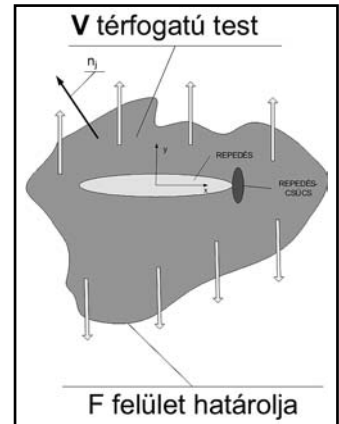
$$U_{csökkenés} = -\frac{\sigma^2}{2E} \pi a^2 \quad (5)$$

Kritikus állapot azon repedéshossznál alakul ki, amelynél a repedéshossz megváltozásával (da – növekedésével) járó energiák összege (deriváltja) zérus, azaz

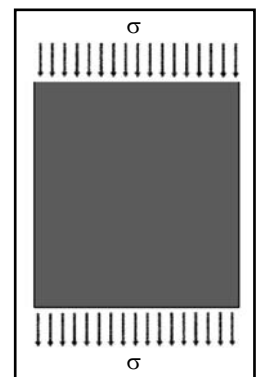
$$\frac{\delta(f + U_{csökkenés})}{\delta a} = 0 = 2\gamma - \frac{\sigma_{krit}^2}{E} \pi a \quad (6)$$

ahol f az új felületek létrehozásához szükséges energia. A (6) kifejezés átrendezésével kapjuk meg a jól ismert (3) összefüggést. Griffith (először gondolati hibáktól mentes elképzelését [3]) bemetszett üveg rudak vizsgálatával igazolta. Ezzel teljesen új útja nyílt meg a törésmechanikának, de két alapvető tényezőtől nem tekinthetünk el. Mégpedig

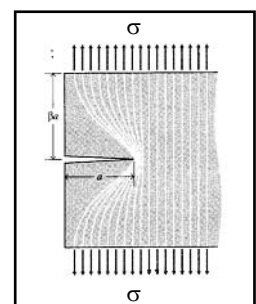
• a repedésterjedés **tökéletesen rugalmasan** viselkedő anyagban valósul meg,



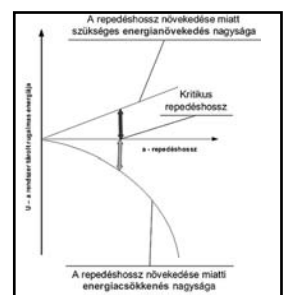
13. ábra. Energetikai megközelítési mód



14. ábra. Egységnyi vastagságú lemezben tárolt rugalmas energia



15. ábra. Az a hosszúságú repedés miatt a βa magasságú, rugalmas energiát nem tároló terület



16. ábra. A kritikus, instabil módon terjedés repedés hossza

• a terhelés **merőleges** a repedés síkjára.

Mindkét fenti kitétel igencsak korlátozza a gyakorlati alkalmazhatóságot!

A magyar születésű és az MTI volt munkatársa **Orován Egon**, 17. ábra [5, 6] volt az, aki módosította a Griffith-féle energetikai elgondolást az 1955-ben, „Energy criteria of fracture” címmel írt cikkében [7]. Már az alcímében is jelzi, a Griffith elmélet módosításának szándékát, hiszen így fogalmaz: „Modifications of Griffith theory...”.

George Rankine Irwin [3, 8], a törésmechanika méltán nevezett atyja (18. ábra) volt az, aki ugyancsak eljutott a (3) kifejezéshez az 1950-es évek közepén (1955-57) és azt a következő formában adta meg:

$$\sigma_{krit} = \sqrt{\frac{EG_{krit}}{\pi a}} \quad (7)$$

ahol G_{krit} azon anyagjellemző, amelyet fajlagos kritikus repedés-terjesztési erőnek nevezett. A „G” jelölés – nem véletlenül! – feltehetően a családra, a **George** vagy **Georgina** (felesége neve) utal.

Miközben folyamatosan kialakultak a „félíg matematikai, félíg mérnöki” törésmechanikai modellek erőteljesen fejlődtek a „tisztán matematikai” törésmechanikai modellek is. Ebben nagy szerepet játszott az a tény, hogy a rugalmasságtan síkbeli feladatainak megoldása kapcsán bevezetésre kerültek az úgynevezett Airy-függvények. Sir **George Biddel Airy**, 19. ábra, a tartókra vonatkozó egyensúlyi feltételek tárgyalása kapcsán [2] jutott arra a következtetésre, hogy a DDF=0 típusú biharmonikus differenciálegyenlet megoldásából a feszültségtenzor elemei a következő módon határozhatók meg

$$\sigma_x = \frac{\delta^2 F}{\delta y^2} \quad \sigma_y = \frac{\delta^2 F}{\delta x^2} \quad \text{ill.} \quad \tau_{xy} = -\frac{\delta^2 F}{\delta y \delta x} \quad (8)$$

ahol F- az úgynevezett Airy-féle feszültségfüggvény, amely valamilyen algebrai vagy trigonometrikus polinom, és a bennük szereplő ismeretlen együtthatókat a peremfelületre vonatkozó feszültségi peremfeltételek alapján kell meghatározni (első peremértékfeladat).

A törésmechanika matematikai elméletében igazi áttörést Jurij Vasziljevics Kolosov, 20. ábra, hozott azzal, hogy a komplex változós függvények bevezetésre kerültek a síkbeli feladatok megoldása kapcsán. Ez ugyanis kihasználta a komplex függvénytan azon szükséges és elégséges feltételeivel bizonyított tételét, hogy amennyiben a komplex sík egy C-vel jelölt zárt görbéje mentén ismerjük a függvény értékét, akkor a zárt görbén belüli tartomány minden pontjában (21. ábra) a következő módon kiszámíthatók a függvények értékei a következő körintegrállal (Cauchy-féle integrálformula)

$$f(z) = \frac{1}{\pi i} \oint_C \frac{f(\xi)}{\xi - z} \quad (9)$$



17. ábra. Orován Egon. (1902. 08.02. Budapest – 1989. augusztus 3. Cambridge, Massachusetts, USA)



18. ábra. G. R. Irwin (középen), Varga T. (jobbra), Tóth L. (balra) Bécsben 1993-ban az „International Society for Technology, Law and Insurance” alapításának idején



19. ábra. Sir George Biddel Airy (1801.07.27 – 1892.01.02.) [2]

ahol:

ζ – a C jelű zárt görbe koordinátái

z – a z-komplex sík ($z=x+iy$, ahol $i=\sqrt{-1}$ az imaginárius egység) koordinátája

$f(z)$ – a komplex függvény z pontban felvett értéke

$f(\zeta)$ – a komplex függvény C-görbe kontúrján felvett értéke.

Ezen integrálformula felhasználásával ugyanis a repedésfelületeken definiálni tudjuk a terheléseket a 22. ábrán látható módokon húzásra, nyírásra és csavarásra. Megjegyzendő, hogy a repedések végpontjaiban matematikai értelemben szingularitás van. Ezt tudomásul véve Kolosov „A komplex változós függvények alkalmazása a matematikai rugalmasságtan síkbeli feladataira” c. doktori értekezésében a repedések csúcsának környezetében kialakuló feszültségek és alakváltozások számítására a következő összefüggéseket kapta:

$$\begin{aligned} \sigma_x + \sigma_y &= 2[\phi'(z) + \overline{\phi'(z)}] = 4 \operatorname{Re} \phi'(z) \\ \sigma_y - \phi_x + 2i\tau_{xy} &= 2[z\phi''(z) + \Psi'(z)] \text{ ahol } \Psi(z) \equiv \chi'(z) \end{aligned} \quad (10)$$

$$2G(u+iv)\chi\phi(z) - z\phi'(z) - \Psi(z)$$

ahol

$$\chi = \frac{3m-4}{m} \text{ sík alakváltozási állapotban, ill. } \chi = \frac{3m-1}{m+1} \text{ sík feszültségi állapotban} \quad (11)$$

$$\phi'(z) = \frac{d\phi(z)}{dz}; \quad \phi''(z) = \frac{d^2\phi(z)}{dz^2} \text{ -et jelöli, míg az}$$

$$u \text{ és } v \text{ az elmozdulás-vektor, a } \vec{t} = u\vec{i} + v\vec{j} \text{ komponensei.}$$

A feszültségek számításánál és különösen az első peremérték feladatok (amikor a peremen a terhelés adott) megoldásánál gyakran alkalmazzák a

$$\phi(z) = \phi'(z) \quad \text{ill.} \quad \Psi(z) = \Psi'(z) \quad (12)$$

helyettesítést, ekkor a feszültségek

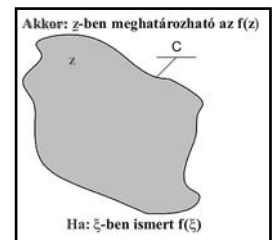
$$\begin{aligned} \sigma_x + \sigma_y &= 4 \operatorname{Re} \phi(z) \\ \sigma_y - \sigma_x + 2i\tau_{xy} &= 2[z\phi'(z) + \psi(z)] \end{aligned} \quad (13)$$

összefüggésekkel számíthatók.

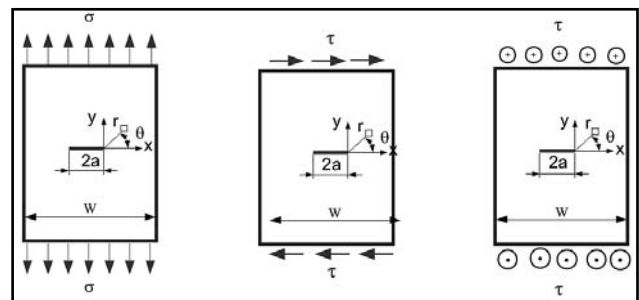
Amennyiben a peremfeltételeket kielégítő $\phi(z)$ és $\Psi(z)$ függvények ismertek, úgy a (10) kifejezésekkel a feszültségi- és alakváltozási állapot tisztázható az alakváltozási tenzor elemeivel együtt az

$$\underline{A} = \frac{1}{2} (\vec{t} \otimes \nabla + \nabla \otimes \vec{t}), \quad (14)$$

elmozdulás-vektor és alakváltozási tenzor közötti úgynevezett geometriai (kis alakváltozásokra vonatkozó) egyenlet figyelembevételével. Itt a $\otimes$ a diadikus szorzatra utal.



21. ábra. A komplex függvénytan egyik nagyjelentőségű, és a törésmechanika fejlődésében jelentős előrelépést eredményező eleme.



22. ábra. A 2a hosszúságú repedés felületén ható terhelések a különböző terhelési módokban (húzás, nyírás, csavarás)

Kolosov munkájával egyértelműen létrejött az a matematikai eszközrendszer, amely alkalmas volt a repedéssel rendelkező testben a repedéscsúcs környezetében ébredő feszültségi-alakváltozási mezők számítására rugalmas anyagmodell esetén, azaz a törésmechanika elvi alapjai kialakultak.

1.b. A lineáris rugalmas törésmechanika kialakulása, fejlődése

A komplex függvények bevezetése általában a síkkbeli feladatok (kontinuummechanika, áramlástan, stb.) megoldásába forradalmi változást eredményezett. Ez abból adódik, hogy a komplex függvénytan eszközrendszere lehetővé teszi az x, y síkon definiált síkkbeli alakzatoknak a komplex síkon definiált úgynevezett egységkörre való leképezését, ill. pontosabban fogalmazva: „Minden egyszerű és egyszerűen



23. ábra.

Niko Muszhevlisvili
(1891.02.16. –
1976.07.16.) [2]

összefüggő T tartomány, amelynek leg-
alább két különböző kerületi pontja van,
kölsönösen egyértelműen és konformisan
– szögtartóan – leképezhető az egy-
ségkörre” [9]. Ebből a felismerésből ere-
deztetve a (10) összefüggés figyelem-
bevételével annak megoldását kell elő-
állítani egységnyi körre úgy, hogy abban
szereplejen a leképező függvény és annak
deriváltjai is. A síkkbeli alakzatokra ezt **Niko**

Muszhevlisvili, 23. ábra, a Grúz Tudomá-
nyos Akadémia alapítója, Kolsov tanít-
ványa, matematikus és mérnök a „Some
basic problems of mathematical theory of
elasticity” című, 1953-ban kiadott könyvében (ill. korábban ennek orosz
nyelvű kiadásában) szisztematikusan meg is tette.

Az angol nyelvterületen széles körben hangoztatott és 1939-ben
publikált „Westergaard-féle megoldás” Kolosov egyenletek csupán a
következő speciális esetei:

- az x tengely mentén ($y=0$) a $\tau_{xy} = 0$ (I. terhelési mód), ill.
- az x tengely mentén ($y=0$) a $\sigma_y = 0$. (II. és III. terhelési mód).

A Koppenhágai születésű (1888) és a
Harvardi Egyetem Mémóki Karának dé-
kánjaként 1950-ben elhunyt, igen széles
körben ismert és elismert szakember,
Harald Malcom Westergaard (24. ábra)
ezen partikuláris megoldásának nagy elő-
nye, hogy mindössze egyetlen feszültség-
függvényre van szükség.

A klasszikus rugalmasságtan alapján a
repedés környezetének matematikai leírá-
sának összefoglalását először a skót szár-
mazású, igen sokoldalú és a kelet európai
szakemberekkel szoros kapcsolatot kiala-
kító matematikus, **Ian Naismith Sneddon**
(25. ábra) 1969-ben társszerzővel kiadott
könyvében tette meg. A könyv címe: „Crack
problems in the classical theory of elasti-
city”.

A 26. ábrán feltüntetett jelölések figye-
lembevételével a repedés csúcsának kör-
nyezetében a klasszikus rugalmasságtani
elvek alapján számított feszültségmező
minden esetben a következő alakú kife-
jezéssel számítható:

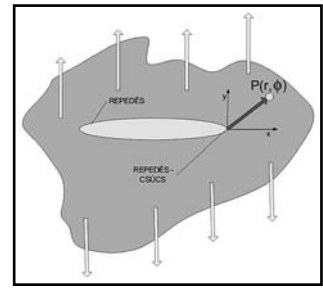
$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\Theta) \quad (15)$$

ahol

- **K** - olyan **invariáns mennyiség**, a feszültségintenzitási tényező, amely
függ a repedés hosszától, a repedésfelületre ható terhelés nagy-

ságától és típusától (húzó, nyí-
ró, csavaró), amelyet egyezmé-
nyesen a terhelés típusára utal-
va K_I , K_{II} vagy K_{III} -al jelöl a
szakirodalom.

- **r** – a repedéscsúcsból mért tá-
volság
- **$f_{ij}(\Theta)$** – a kiválasztott pontba
mutató vektor és a repedés sík-
jával bezárt szögtől függő geo-
metriai tényező.



26. ábra. A repedéscsúcs
környezetének állapota

A (15) kifejezést szemlélve a
következő megállapítások tehe-
tők:

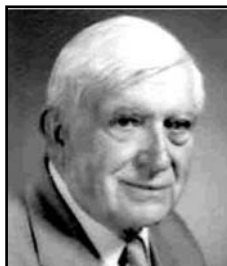
- a **K** invariáns mennyiség jelle-
ge arra utal, hogy ugyanazon
K érték több repedéshossz,
terhelés kombinációval állítha-
tó be, állítható elő
 - a kiválasztott **P** pontban
r=const és **$\Phi=const$** a terhe-
lés növekedésével a feszült-
ség-tenzor megfelelő elemei
növekednek, és ez csak a K
növekedésének következmé-
nye,
 - a **K** értéke addig növekedhet csupán, ameddig az eléri az anyag
vizsgált állapotára jellemző kritikus értéket, az anyag repedés-
terjedéssel szembeni ellenállását, amelyet a terhelés típusától
függően K_{Ic} , K_{IIc} vagy K_{IIIc} jelöl,
 - a repedés csúcsában, az **r=0** helyen a legkisebb terhelés hatására is
végtelen nagyságú feszültség ébred, amelyet a matematikai
formalizmus szingularitásként kezel, de az anyag viselkedése
tekintetében ez nyilvánvalóan nem helytálló,
 - a rugalmasságtan lineáris egyenleteiből következik, hogy
többtengelyű igénybevétel esetén a **K** értékek számítása additív.
- A lineárisan rugalmas testben a repedések csúcsának környe-
zetében kialakuló mezők számításának matematikai hátterét megadva
egyrészt a gyakorlati alkalmazások elősegítése érdekében a lehetséges
legkülönbözőbb estek (terhelési, geometriai) megoldása felé fordult a
szakemberek nagy tömege, másrészt pedig az elméleti megfon-
tolásokkal kapott megoldások kísérleti ellenőrzéséhez. Ezt a tényt hűen
tükrözi az amerikai Kísérleti Mechanikai Egyesület (Society for
Experimental Mechanics – SEM) és a Nemzetközi Optikai Mérnök Egye-
sület (International Society for Optical Engineering – SPIE) gondozá-
sában 1997-ben publikált klasszikus közlemények gyűjteménye is [11]. E
közlemények alapvetően a repedéscsúcs környezetében kialakuló
feszültségmezők számításával foglalkoznak. A kiválasztott 51 publikációk
egyrészt az 1956–1987-es periódust ölelik át, másrészt az analitikus (24
cikk), a numerikus megoldások (19 közlemény) és a kísérleti ellen-
őrzések (18 cikk) köré csoportosítja a klasszikusnak ítélt publikációkat.
Ez utóbbiaknál a feszültségoptikai és holografikus interferencia, valamint
a kausztikák módszerének alkalmazhatóságát demonstrálják a szerzők
álló és mozgó repedéseknél.

A feszültségintenzitási tényezőre alapozott lineárisan rugalmas
törésmechanika fejlődése gőzerővel indult meg az 1970-es évek elejétől.
Ennek a következő négy alapvető oka volt:

- Egyrészt már megjelentek a „zárt szabályozó rendszerű” digitális
vezérlésű anyavizsgáló berendezések és ezzel az anyagok repedés-
terjedéssel szembeni ellenállása reprodukálhatóan mérhetővé vált, azaz
megjelenhetett az első anyagvizsgálati szabvány (ASTM E399-70) is.
- Másrészt az elméleti alapok birtokában a legkülönbözőbb gyakorlati
estekre megoldások lettek előállíthatók, és ezeket kézikönyvekben



24. ábra. Harald Malcom
Westergaard (1888.
Koppenhága – 1950
Harvard Egyetem) [2]

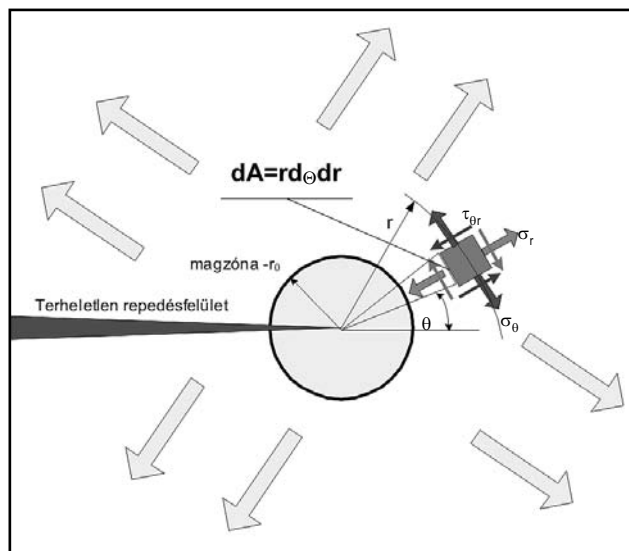


25. ábra. Ian Naismith
Sneddon (1919.12.08.-
2000. 11.04.) [10]

foglalták össze. Az első kézikönyv 1973-ban jelent meg G. Sih feldolgozásában [12], amelyet számos követett [13, 18]. Ezek közül a legelterjedtebben alkalmazott a Murakami Yukitaka által szerkesztett sorozat, amelynek első két kötete 1986-ban, míg a jelenlegi utolsó két, 4 és 5. kötete 2001-ben jent meg.

• Harmadrészt a repedés felületén ható állandó, konstans feszültségekre született megoldásokra alapozva a tetszőleges feszültségeloszlásra érvényes feszültségintenzitási tényezők is meghatározhatók lettek az úgynevezett „súlyfüggvények” módszerének alkalmazásával [19, 20]. E módszer alkalmazásánál egyrészt a rugalmasságtan lineáris egyenleteiből következő additívítást, másrészt a repedést nem tartalmazó feszültségeloszlást (pl. a maradó feszültségek eloszlását) lehet figyelembe venni.

A negyedik okot az adta, hogy viszonylag egyszerűen általánosítható síkbeli terhelés esetén a repedés megindulási irányának kijelölésére. Ennek gyakorlati jelentősége meglehetősen nagy, hiszen a lineárisan rugalmas törésmechanika (LEFM) kialakulását követően a gyakorlati alkalmazás is igen széles körben megindult. Ennek egyik iránya volt az úgynevezett repedésgátló, fékező elemek elhelyezése különböző szerkezeti elemekben pl. repülőgépek szárnyain bórszállal erősített „tapaszok” formájában. Az elhelyezéshez ismerni kell a repedések terjedésének várható irányát. George Sih volt az, aki bevezette az „alakváltozási energiasűrűség” (strain energy density) fogalmát 1973-ban [21]. Ennek lényege a 28. ábra figyelembevételével a következő:



28. ábra. Az alakváltozási energiasűrűség értelmezése

– a repedés csúcsa előtt kijelölünk egy úgynevezett magzónát, amelyre nézve biztosan nem érvényes mindaz, amit állítunk,
– a magzónán kívül, például ahol az ébredő feszültségek kisebbek, mint az anyag folyási határa kijelölünk egy egységnyi $dA = r dr d\theta$ felületet és kiszámítjuk az itt tárolt rugalmas alakváltozási energiát

$$\frac{dE}{dA} = \frac{1}{r} (a_{11} K_I^2 + 2a_{12} K_I K_{II} + a_{22} K_{II}^2) + \dots \quad (16)$$

amelyben $a_{11} = \frac{1}{(1 + \cos \theta) (\lambda - \cos \theta)}$?

$$a_{12} = \frac{16\pi G}{1} \sin \theta [2 \cos \theta - (\lambda - 1)] \quad (17)$$

$$a_{22} = \frac{16\pi G}{1} [(1 + \lambda) (1 - \cos \theta) + (1 + \cos \theta) (3 \cos \theta - 1)],$$

ahol $\lambda = \frac{3m-4}{m}$ sík-alakváltozási állapotban (amikor az adott pont csak a síkban mozoghat el a külső terhelés hatására – ehhez természetesen

térbeli feszültségállapotra van szükség) ill. $\lambda = \frac{3m-1}{m+1}$ síkfeszültségi

állapot esetén (amikor az adott síkra merőlegesen nem ébred feszültség és a feszültségi vektornak csak a síkba eső komponensei vannak) és G – a csúsztató rugalmassági modulus és $m=1/\mu$ értéke (μ – a Poisson-szám, a kereszt és hosszirányú rugalmas nyúlások hányadosa), a K_I , K_{II} pedig a megfelelő terheléskomponenshez tartozó feszültségintenzitási tényező.

– Az $S = a_{11} K_I^2 + 2a_{12} K_I K_{II} + a_{22} K_{II}^2$ kifejezés dimenzióját tekintve J/m^2 , azaz egységnyi felületen tárolt energiát tükröz, így az alakváltozási energiasűrűség (strain energy density, Energiedichtefaktor) elnevezést kapta.

– Adott terhelési és geometriai (próbatétel, ill. repedés) paraméterek ismeretében a K_I , K_{II} konkrét értéke számítható a rugalmassági jellemzők figyelembevételével az alakváltozási energiasűrűség csak a θ , azaz a repedés síkjá által bezárt szög függvénye lesz, azaz

$$S = f(\theta) = a_{11} K_I^2 + 2a_{12} K_I K_{II} + a_{22} K_{II}^2 \quad (18)$$

A (16) és (18) kifejezések szerint

$$\frac{dE}{dA} = \frac{S}{r} \quad (19)$$

azaz $r \rightarrow 0$ esetén az egységnyi felületelemben tárolt rugalmas energia a végtelenhez tart, ami nyilvánvalóan nem lehetséges. Ezért ezen elképzelés úgy értelmezhető, hogy a terhelésmentes testben levő repedés csúcsában kiválasztunk egy r_0 sugarú úgynevezett magzónát és a terhelés növekedése során csak ebe zónán kívüli helyen vizsgáljuk az elnyelt energiát. Mint minden folyamat, a repedés terjedése is a legkisebb ellenállás irányába, azaz az $S_{\min}$ által meghatározott irányba fog végbemenni. A repedés terjedésének megindulása pedig akkor következik be, ha a magzónában a terhelés növekedése során az egységnyi felületen felhalmozódott alakváltozási energia eléri az anyagra jellemző kritikus, S_{kr} értéket. Az előzők szerint, tehát a repedés irányát a

$$\frac{dS}{d\theta} = 0 \quad (20)$$

feltételből meghatározott $\theta = \theta_0$, míg a repedés megindulásához tartozó igénybevételt az $S = S_{kr}$ jelöli ki.

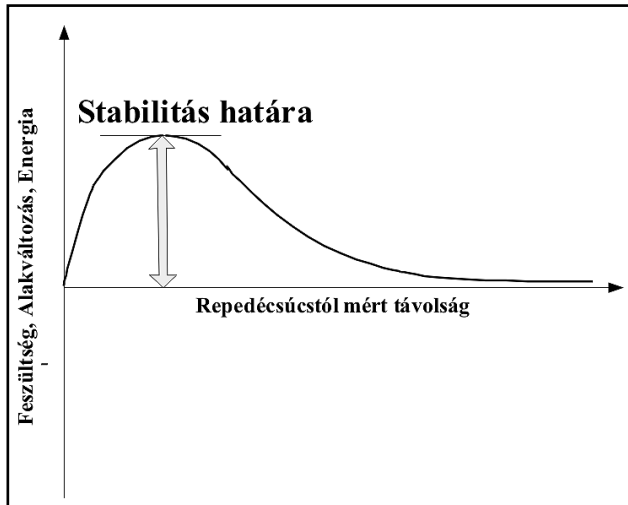
A (15) összefüggést figyelembe véve (nagyon leegyszerűsítve) azt is mondhatjuk, hogy a repedés síkjában ($\theta=0$), a repedés csúcsa előtt kialakul egy kör alakú képlékeny zóna, ahol a σ feszültség értéke eléri az anyag folyási határát, az R_{eH} értékét, azaz $\sigma = R_{eH}$. Ebből adódóan a képlékeny zóna sugarára

$$r_k^x = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{K_I}{R_{eH}} \right]^2 \quad (21)$$

kifejezés adódik.

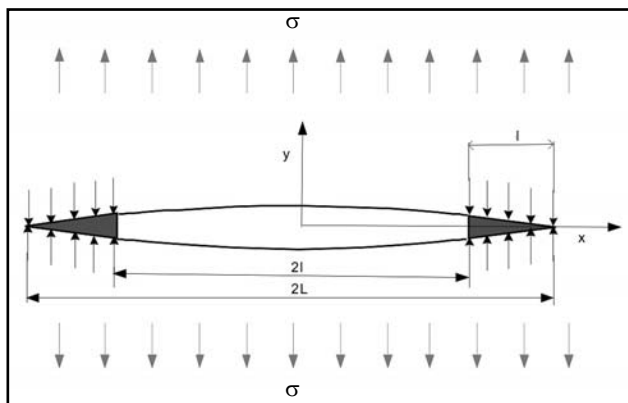
1. c. A repedéscsúcs modellek (Barenblatt, Panasyuk, Dugdale)

A lineárisan rugalmas anyagmodell alapul vevő, matematikailag korrekt elgondolás egyetlen hibája mérnöki szempontból az, hogy a repedés csúcsában ($r=0$) ébredő feszültségek már a legkisebb terhelés esetén is végtelen nagyságúak, azaz a szilárd testben levő repedés instabilitásának be kellene következnie és így nem definiálható olyan anyagjellemző, amely a repedésterjedéssel szembeni ellenállást tükrözi! A matematikai gondolkodásmódban ez nem jelent semmi mást, mint azt, hogy a repedéscsúcsban ($r=0$) a megoldásnak $1/\sqrt{r}$ típusú szingularitása van. Ezt az ellentmondást kísérlik meg feloldani, az úgynevezett **repedéscsúcs modellek**. Ezek lényege, hogy a repedéscsúcs közvetlen környezetében feltételeznek valamilyen feszültségeloszlást az anyagban és így elemzik mechanikailag az egyensúly feltételeit. Az első ilyen repedéscsúcs-modellt Barenblatt javasolta az 1959-ben folytatólagosan 25 nyomtatott oldalon megjelent két közleményében [22,



29. ábra. Barenblatt „repedéscsúcs” modellje

23]. Eredményeit még 1961-ben egy több mint 70 oldalas angol nyelvű közleményében is összefoglalta és általánosította [24]. Javaslatának lényege az, hogy a repedéscsúcs környezetében külső terhelés hatására az anyagban olyan jellegű feszültségeloszlás alakul ki, mint amilyen az atomok között ébred miközben azokat egymástól eltávolítani igyekszünk, mint ahogy ezt a 29. ábra szemlélteti. A matematikailag egyébként korrekt modellben a terhelés növekedésével a repedéscsúcs előtt az anyagban kialakult a 29. ábrán látható jellegű feszültség- (alakváltozás, energia) eloszlás. Mérnöki szempontból gondot jelent azonban a stabilitási kritériumhoz tartozó anyagjellemző definíciója és kísérleti módszerekkel történő meghatározása. Ezt a problémát oldja fel az ugyancsak 1959-ben Leonov és Pansyuk által javasolt modell [25, 26]. A 30. ábra jelöléseit figyelembe véve, ha feltételezzük, hogy egy rugalmas, végtelen kiterjedésű, σ húzó feszültséggel terhelt lemezben, $2l$ tényleges hosszúságú repedés mindkét csúcsának környezetében az anyagban Δl hosszán, az anyagi tulajdonságokat hordozó σ_0 feszültség ébred akkor a $2l$ hosszúságú repedés tövében a repedés kinyílása, δ az egyensúly feltételéből számítható. A repedéstől kinyílása, szétnyílása, adott repedéshossz esetén természetesen a terhelő külső feszültség függvénye, azaz $\delta(\sigma)$. Ez a repedéscsúcs modell tehát olyan, mint egy „csipesz”, amely az egyensúlyt biztosítja mindaddig, amíg a repedés terjedése meg nem indul, azaz a δ eléri az anyag adott állapotára vonatkozó kritikus értéket, a δ_{krit} értékét.



30. ábra. Repedéscsúcs-modellek

A repedéscsúcs kinyílása a következő összefüggéssel számítható:

$$\delta(\sigma) = -[(8\sigma_0 l) / (\pi E)] \ln \cos[(\pi / 2)(\sigma / \sigma_0)] \quad (22)$$

Ha ismerem, azaz kísérletileg meg tudom határozni az anyag adott

állapotára jellemző δ_{krit} értékét, akkor a repedésterjedést előidéző kritikus terhelést, a σ_{krit} értékét a következő kifejezéssel számíthatom:

$$\sigma_{krit} = (2 / \pi) \sigma_0 \arccos \exp(-d_{krit} / l), \text{ ahol } d_{krit} = (\pi E \delta_{krit}) / (8 \sigma_0) \quad (23)$$

Mindezek figyelembevételével az „élet-halál mezsgyéjét” reprezentáló Δl távolság számítható a

$$\Delta l = L - l \sec[(\pi \sigma / 2 \sigma_0) - 1] \quad (24)$$

összefüggéssel. A modell gyakorlati alkalmazásához tehát ismerni kell a repedéscsúcs σ_0 feszültségeloszlását és a kritikus állapotot kifejező anyagjellemzőt a δ_{krit} értékét.

Az angol Dugdale – Panasyukéktól függetlenül – 1960-ban közölt cikkében feltételezte, hogy a repedéscsúcs σ_0 feszültségeloszlása megegyezik az anyag egytengelyű folyási határával [27], azaz a (22)-(24) összefüggésekbe a $\sigma_0 = R_{eH}$ vagy $R_{p0.2}$ helyettesítést kell tenni. Érdekességgént említhető meg, hogy a két szakember először Sheffieldben találkozott. A közös fényképet e közlemény szerzője készítette 31. ábra.



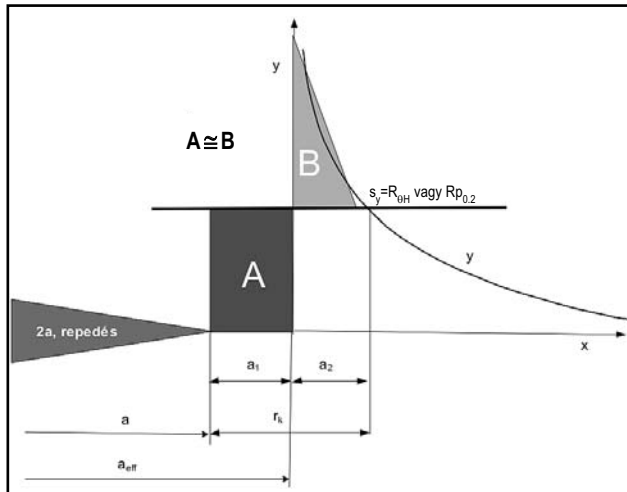
31. ábra. D.S. Dugdale és V.V. Panasyuk Sheffieldben (balra Dugdale-től A.Ja. Krasowsky, lehajtott fejű M. Bily)

Az így megalkotott és az angolszász irodalomban Dugdale – modellként emlegetett elgondolást igazán felhasználóképpessé Alan Arthur Wells (1924.05.01.-2005. 11. 08.), 32. ábra [29], tette, aki 1961-ben, az angol hegesztési intézet (BWRA) igazgatóhelyetteseként írt cikkében [28] rámutatott a kritikus repedéskinyílás, a δ_{krit} a COD (Crack Opening Displacement) mérhetőségére.



32. ábra. Alan Arthur WELLS (1924.05.01. – 2005.11.08.) [29]

A repedéscsúcs környezetében kialakuló képlékeny zóna méretének becslésére a 18. ábrán már látható G. R. Irwin is tett egy olyan, de mérnöki megfontolásokon nyugvó javaslatot, amelyet a gyakorló mérnökök a törésmechanikai vizsgálatok érvényességének megítélésére a mai napig is szabvány szinten használnak. Az elgondolás lényegét a 33. ábra szemlélteti. Véleménye szerint az ábrán feltüntetett a félhosszúságú repedés a képlékenységi miatt úgy viselkedik, mintha tényleges hosszánál nagyobb, $a_{eff} = a + a_1$ félhosszúságú, rugalmas anyagban levő repedés lenne, azaz a repedéscsúcs környezetében a képlékenységi miatt az elmozdulás nagyobb, a helyi merevség kisebb, mint tisztán rugalmas esetben. A feszültségek eredője a repedés környezetében ugyanolyan, mint rugalmas esetben, csupán annak átrendeződése megy végbe. Az előzők alapján az $a_{eff} = a + a_1$ félhosszúságú repedés csúcsa előtt a feszültség a_2 helyen éri el a folyási



33. ábra. A repedéscsúcs előtt kialakuló képlékeny zóna G. R. IRWIN által javasolt modellje ($A \cong B$ feltétel).

határ értékét. A tényleges a félhosszúságú repedés csúcsa előtt a feszültség az $r_k = a_1 + a_2$ tartományban a folyási határral megegyező. A feszültségek eredőjének azonossága miatt (csupán átrendeződés megy végbe a repedéscsúcs környezetében) a 32. ábrán feltüntetett A és B terület egyenlő. A (15) összefüggés ($\theta=0$, a repedés síkjában) szerint a

$K_I = \sigma \sqrt{\pi a_{eff}}$ figyelembevételével

$$\sigma_y = R_{eH} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi a_2}} = \sigma \sqrt{\frac{(a + a_1)\pi}{2\pi a_2}} \quad (25)$$

azaz

$$a_2 = \left(\frac{\sigma}{R_{eH}} \right)^2 \frac{a + a_1}{2} \approx \left(\frac{\sigma}{R_{eH}} \right)^2 \frac{a}{2} \quad (26)$$

adódik, mivel $a_1 \ll a$. Az A és B területek egyenlőségéből

$$R_{eH} \cdot a_1 = \int_0^{a_2} \frac{K_I}{\sqrt{2\pi x}} dx - R_{eH} \cdot a_2 \quad (27)$$

feltételhez jutunk. A (26) és (27) összefüggések, valamint az $a_1 \ll a$ feltétel figyelembevételével

$$(a_1 + a_2)^2 = r_k^2 = 4a^2 \quad (28)$$

azaz $a_1 \sim a_2 = r_k/2$. Jó közelítéssel tehát azt mondhatjuk, hogy az Irwin modellje szerint a tényleges repedés csúcs előtt egy

$$r_k = 2a_2 = \left(\frac{\sigma}{R_{eH}} \right)^2 a = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_I}{R_{eH}} \right)^2 = 2r_k^2 \quad (28)$$

méretű, kör alakú képlékeny zóna alakul ki. A (21) és (28) összefüggések alapvetően eltérő megfontolások alapján adódtak, mégis ugyanazt a tényt tükrözik, azt, hogy a terhelőfeszültség vagy a repedés-hossz növelésével, ill. az anyag folyási határának csökkenésével a képlékeny zóna mérete nő. A két különböző megfontolást figyelembe véve a $\left(\frac{K_I}{R_{eH}} \right)^2$ szorzója $1/\pi=0,318$ vagy $1/2\pi=0,159$. A rugalmas és képlékeny zónákat ezen feltételezés szerint kör választja el, amelynek középpontja $r_k^*/2$, ill. $r_k/2$.

Az előző megfontolásoknál lényegesen többet mond, ha a repedés csúcsának környezetében kiszámítjuk a redukált feszültséget és azt valamilyen folyási feltétellel vetjük össze. Ekkor a képlékeny zóna kontúrja is kijelölhető a 22. ábrán látható bármelyik terhelés módban (húzás, nyírás és csavarás). Az I. terhelési módban pl. a lemez felületén ahol síkfeszültségi állapot érvényesül $\sigma_z=0$, a lemez középsíkijában, ahol sík alakváltozási állapot lép fel (azaz a középsík pontjai csak a saját

síkjukban mozdulhatnak el a külső terhelés hatására $\sigma_z = \frac{1}{m} [\sigma_x + A\sigma_1$ és σ_2 főfeszültségek (amelyhez tartozó $\tau=0$) a

$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (29)$$

kifejezésekkel számíthatók. Az I. terhelési módban a (15.) összefüggés a következő alakú lesz:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_y &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \tau_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \end{aligned} \quad (30)$$

A (30) kifejezés figyelembevételével a főfeszültségekre

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \right) \\ \sigma_2 &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \right) \end{aligned} \quad (31)$$

kifejezéseket kapunk. A a harmadik főfeszültség értéke a lemez középsíkijában, ahol sík alakváltozási állapot érvényesül a

$$\sigma_3 = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \quad (32)$$

összefüggéssel számítható, míg a lemez felületén, ahol síkfeszültségi állapot ébred a harmadik főfeszültség nagysága zérus, azaz $\sigma_3=0$. A főfeszültségek ismeretében számított redukált feszültség és valamilyen folyási feltétel figyelembevételével a repedéscsúcs környezetében a rugalmasan és képlékenyen alakváltozott tartományok határvonala kijelölhető.

A Huber-Miseses-Hencky-féle kritérium szerint a képlékeny folyás állapotában a

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 = 2R_{eH}^2 \quad (34)$$

míg a Tresca (Saint-Venant, Columb-féle) kritérium szerint képlékeny folyásnál a

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2\tau_{max} = R_{eH} \quad (35)$$

feltételnek kell teljesülni.

A (31-34) összefüggés figyelembevételével a képlékeny zóna határát sík feszültségi állapotban ($\sigma_3 = 0$) a Huber-Miseses-Hencky-féle folyási feltétel alapján az

$$r_k = \left(\frac{K_I}{R_{eH}} \right)^2 \frac{1}{4\pi} \left[1 + \frac{3}{2} \sin^2 \theta + \cos \theta \right] \quad (36)$$

a Tresca folyási feltétel szerint az

$$r_k = \left(\frac{K_I}{R_{eH}} \right)^2 \frac{1}{2\pi} \left[\cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \right) \right]^2 \quad (37)$$

összefüggés jelöli ki. Hasonlóan síkalakváltozási állapotban a Miseses-féle folyási feltételt figyelembe véve

$$r_k = \left(\frac{K_I}{R_{eH}} \right)^2 \frac{1}{4\pi} \left[\frac{3}{2} \sin^2 \theta + (1 - 2\mu)^2 (1 + \cos \theta) \right] \quad (38)$$

míg a Tresca folyási feltétel alapján

$$r_k = \left(\frac{K_I}{R_{eH}} \right)^2 \frac{1}{2\pi} \cos^2 \frac{\theta}{2} \left[1 - 2\mu + \sin \frac{\theta}{2} \right]^2 \quad (39)$$

kifejezés adódik, a képlékenyen rugalmas zóna határát leíró (r, θ) kapcsolatra, ahol μ a Poisson szám értéke, acélokra hozzávetőlegesen 0,33. Ha a (36)-(39) összefüggéseket ábrázoljuk, akkor a következő megállapítások tehetők:

- a TRESCA-féle folyási kritérium (a legnagyobb Mohr-kör sugara azonos az egytengelyű szakítóvizsgálattal meghatározott folyási határral) mind a síkfeszültségi, mind pedig a síkalakváltozási állapotban nagyobb méretű képlékeny zónát eredményez, mint a Huber-Miseses-Hencky féle kritérium.

- A síkfeszültségi állapothoz tartozó képlékeny zóna mérete nagyobb,

mint a sík alakváltozási állapotban. Ennek direkt gyakorlati következménye az, hogy

- a repedés csúcsa előtt egy „kutycsont” alakú, a bevitt energiát elnyelő, képlékeny zóna alakul ki,
- a bevitt külső energiából kevesebb nyelődik a középsíkban, mint a felületen képlékeny alakváltozás miatt, azaz középen több fordítódik a repedés terjesztésére, így a repedés hossza itt nagyobb lesz,
- a vastagabb lemezeknél fajlagosan nagyobb energiahányad jut a repedés terjesztésére, mivel fajlagosan nagyobb lesz a sík alakváltozási (vagy ezt megközelítő) hányad.

A repedéscsúcs közvetlen környezetében lejátszódó alakváltozások - feszültségek még részletesebben is elemezhetők a folyási kritériumok valamelyikével kijelölt megfolyást követően. Ezt többen is elvégezték, pl. 1968-ban Rice és Rosengren [30], ill. Hutchinson is [31] ugyanazon folyóirat ugyanazon számában folytatódóan publikálták elképzeléseiket. A numerikus módszerek széleskörű elterjedésével szinte minden modell eredménye számszerűsíthető. A képlékeny zóna belsejében – a választott anyagi modell – végbemenő alakváltozási, energia elnyelő folyamatok kvalitatív és hozzávetőleges kvantitatív értékelése a műszaki életben is hasznosítható, gyakorlati jelentőséggel bírhat a következő területeken:

- a túlterhelés hatásának értelmezése és a repedéssel rendelkező szerkezet várható biztonságának megítélésében,
- az ismétlődő terhelések során mutatott viselkedés értékelésében (beleértve a periodikus túlterhelés hatását is), valamint
- a maradó feszültségek eloszlásának és nagyságának értékelésében (ami különösen a technológiailag, a technológiai paraméterekkel szabályozható maradó feszültségek tudatos létrehozása esetén igen nagy jelentőségű lehet, pl. hegesztés, lokális képlékeny alakítások, hőbevitel, stb.)

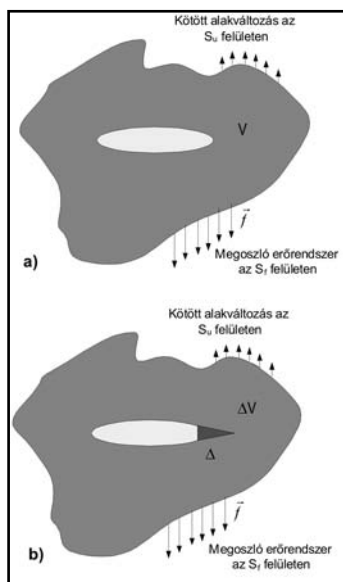
1.d. A J-integrál értelmezése

Néhány szóban már megemlítsük a repedés-terjedés energetikai kritériumainak különböző formái elsősorban Griffith, Orvan, Irwin vagy Sih nevére hivatkozva. A repedés terjedésének energetikai feltétele természetesen lényegesen általánosabban is megfogalmazható, ha a termodinamika első főtételére, az energia-megmaradás törvényére támaszkodunk. Ha egy $\underline{S}$ felülettel határolt $\underline{V}$ térfogatú testben levő $\underline{\Sigma}$ felületű belső folytonossági hiba (pl. repedés) a felületen és térfogaton megoszló erőrendszer hatására növekszik (34. ábra), akkor a test pillanatnyi állapotára nézve teljesülni kell az

$$\dot{A} + \dot{Q} = \dot{K} + \dot{U} + \dot{\pi} \quad (40)$$

feltételnek, amelyben

- $\dot{A}$ – az $\underline{S}$ felületen megoszló külső- és a $\underline{V}$ térfogaton megoszló belső erőrendszer munkája időegység alatt,
- $\dot{Q}$ – az $\underline{S}$ felületen egységnyi idő alatt bevezetett hőmennyiség,
- $\dot{K}$ – a test kinetikai energiájának növekedése időegység alatt,



34. ábra. Repedést tartalmazó test energetikai viszonyainak jellemzése
Kiinduló állapot ($\underline{V}$ – térfogat, $\square$ – belső – repedés – felület)
A terhelés hatására bekövetkező térfogatváltozás (ΔV) és repedésfelület megnövekedése ($\Delta \square$)

$\dot{U}$ – a test időegység alatti belső energia növekménye,

$\dot{\pi}$ – a repedésfelület növekedésére időegység alatt felhasznált energia.

A (40) kifejezés teljesen általános, így bármilyen feladat megoldásának kiinduló összefüggése. A konkrét gyakorlati problémák megoldása során azonban olyan egyszerűsítésekre van szükség, amelyek gyakran kétséges, hogy az, hogy a végbemenő folyamatok úgy következnek be, mint ahogy azt a modell alapján végzett számítások eredményei megkövetelik.

Az általános energetikai modell alkalmazhatóságának bemutatására tekintsük egy folytonossági hibával rendelkező test 34. ábrán bemutatott két állapotát. Az $\underline{S}$ felülettel határolt $\underline{V}$ térfogatú test $\underline{S}_U$ felülettel határolt részén a $\underline{t}_i$ ($i = 1, 2, 3$) elmozdulás-vektor, míg az $\underline{S}_F$ felületén ($\underline{S} = \underline{S}_U + \underline{S}_F$) az $\underline{f}_i$ ($i = 1, 2, 3$) felületen megoszló erőrendszer adott. A folytonossági hiba (repedés) $\underline{\Sigma}$ nagyságú felülete terhelésmentes. A test ezen állapotában a feszültségi, az alakváltozási és az elmozdulási mezőt jelölje $\sigma_{ij}^0, \varepsilon_{ij}^0, t_i^0$ ($i, j = 1, 2, 3$). Abban az esetben, ha a terhelés hatására a folytonossági hiba felülete $\Delta \underline{\Sigma}$, míg térfogata $\Delta \underline{V}$ értékkel növekszik, a test állapota is természetesen megváltozik. Ekkor a feszültségi, az alakváltozási és az elmozdulási mezőt jelölje

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^0 + \Delta \sigma_{ij}, \varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^0 + \Delta \varepsilon_{ij}, t_i = t_i^0 + \Delta t_i \quad (41)$$

Abban az esetben, ha a 32. ábrán feltüntetett $\underline{a}$ állapotból a $\underline{b}$ állapotba való átmenet lassú (kvázistatikus) és hőárammal nem kell számolni ($\dot{K} = \dot{Q} = 0$), akkor a (40) kifejezés

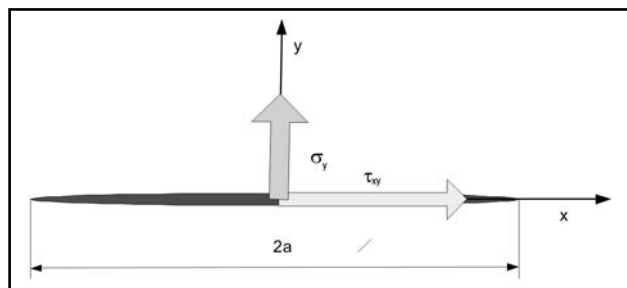
$$\Delta U - \Delta A = -\Delta \pi = \Delta(U - A) = \Delta E \quad (42)$$

Kimutatható [32] hogy amennyiben a test lineárisan rugalmas (érvényes a Hooke-törvény) és a folytonossági hiba növekedése során annak térfogatváltozása ($\Delta \underline{V}$) elhanyagolható, azaz repedésszerű (ideálisan vékony bemetszés) hibáról van szó, akkor

$$\Delta E = \frac{1}{2} \int_{\Delta \Sigma^+} f_i^+ [\Delta t_i] dS \quad (43)$$

ahol a repedés két felületének elmozdulásának különbsége, a az új repedésfelület egyik fele, a repedésfelületek egyikére ható külső erőrendszer. A (43) kifejezés felhasználásával különböző terhelési esetekre, eltérő repedéskonfigurációknál az energiaváltozás számítható.

A legegyszerűbb esetet szemlélteti a 35. ábra. Ekkor a repedésfelületek egyikére ható külső erőrendszer:



35. ábra. Repedéssel rendelkező test energetikai viszonyai az I. terhelési módban

$$f_i^+ = f_x^+ \vec{i} + f_y^+ \vec{j}, f_x^+ = -\tau_{xy}, f_y^+ = \sigma_y, a \Delta t_i = 2 [\Delta t_i^+] \quad (44)$$

(a szimmetria miatt) $\Delta t_i = 2[u^+ + v^+](\vec{t} = u \vec{i} + v \vec{j})$ és $dS = dx$, így a (43) kifejezés

$$\Delta E = - \int_0^{2a} (\tau_{xy} u^+ + \sigma_y v^+) dx \quad (45)$$

Ahhoz, hogy az előbbi integrál számítható legyen, ismerni kellene a repedéscsúcs környezetében a feszültségeket és az elmozdulásokat. A rugalmasságtan egyenleteinek érvényességével meghatározott feszültségi és alakváltozási mező e terhelési esetre a (30) összefüggések

tükrözik. Ezeket a (45) kifejezésbe helyettesítve, az integrálást elvégezve

$$\Delta E = -\frac{K_I^2}{8G}(\lambda + 1)\Delta a \quad (46)$$

adódik, amelyben $\lambda = \frac{3m-1}{m}$ sík alakváltozási, ill. $\lambda = \frac{3m-1}{m+1}$ sík feszültségi állapot esetén ($m=1/\mu$, ahol μ – a Poisson szám). A (46) kifejezés tartalmát tekintve lényeges következtetésre juthatunk. Nevezetesen arra, hogy a $\frac{\Delta E}{\Delta a}$ mennyiség véges, hisz a K_I is véges. Így a $\frac{\Delta E}{\Delta a}$ anyagi tulajdonságok hordozója. A (42) kifejezésnél a Griffith-féle elgondolást figyelembe véve $\Delta\pi=2\Delta a\gamma$ energia szükséges a $2a$ nagyságú új repedésfelület létrehozásához. A (42) és (46) összefüggések szerint

$$\frac{K_I^2}{8G}(\lambda + 1) = 2 \quad (47)$$

egyenlőség adódik, ill. ha a lemez végtelen kiterjedésű, átmenő repedést tartalmaz és a terhelés $\sigma = \text{áll.}$ a repedés síkjára merőleges (a Griffith-féle alapfeladat), akkor $K_I = \sigma\sqrt{\pi a}$, valamint a rugalmassági jellemzők)

$E = 2G\frac{m+1}{m}$ kapcsolatot is figyelembe vesszük, akkor a

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a(1-\mu^2)}} \quad (48)$$

kifejezéshez jutunk ($\mu=1/m$). Az alakilag azonos (7) és (48) összefüggésekről azonban érdemes megjegyezni, hogy alapvetően különböző kiindulási feltételből, mechanikai modellből, erősen eltérő matematikai apparátussal vezettük le. A (7) kifejezés a rugalmas testben levő erősen elnyújtott elliptikus kivágás környezetében ébredő elmozdulások által a $\sigma = \text{áll.}$ feszültségtérben végzett munka és az új repedésfelületek képződéséhez szükséges energia összevetéséből adódott. A (48) kifejezés viszont egy rugalmas testben matematikai értelemben vonalszerű folytonossági hiány növekedése során a csúcsok környezetében felszabaduló energiát veti össze az ugyanitt képződő új repedésfelületek létrehozásához szükséges energiával. Ebben az esetben az elmozduló repedéscsúcsok jelentik az energiaforrást. A két energia a (40) kifejezésnél alkalmazott egyszerűsítések után megegyezik, azaz míg Griffith megoldásánál az egész testet jellemző rugalmas energiából indult ki, addig az energia-megmaradás tételének felhasználásával végzett számításnál a repedéscsúcs környezetében tárolt energia az új felületek létrehozásához szükséges energiaforrás. Az adott egyszerűsítések figyelembevételével e két mennyiség megegyezik, azaz fennáll a

$$\frac{dW(\sigma, a)}{da} = \frac{dE}{da} \quad (49)$$

feltétel.

Nemlineárisan rugalmas anyagtörvény esetén síbeli feladatoknál a külső terhelés hatására kialakuló feszültség- és alakváltozási mező ismeretében a 36. ábrán látható jelölések figyelembevételével bizonyítható

$$J = \oint_C [u(\varepsilon_{ij})/dx_2 - \vec{f}_{ni}(dt_i/dx_1)ds] \quad (50)$$

integrál értéke független a repedéscsúcsot körülvevő C-görbe alakjától, ahol

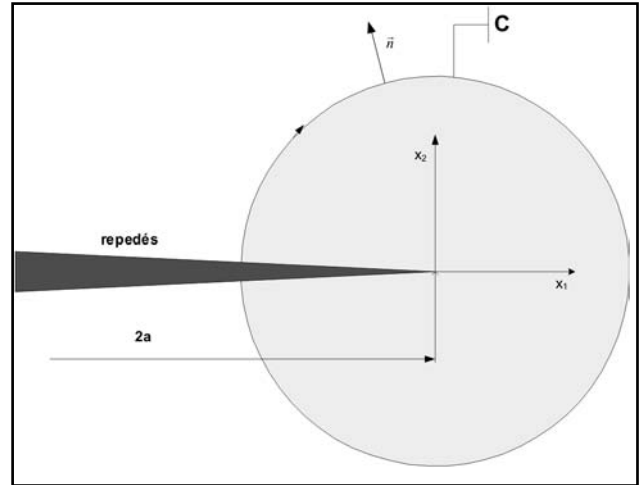
$u(\varepsilon_{ij}) = \int_0^{\varepsilon_{ij}} \sigma_{mn} d\varepsilon_{mn}$ a C-görbe pontjaiban,

$\vec{f}_{ni} = \sigma_{ij}n_j$ a C-görbe pontjaiban egy ds hosszúságú ívelemre ható erő komponensei,

n_j – a C-görbe normálvektora,

t_i – az elmozdulás-vektor koordinátái a C-görbén.

Az (50) összefüggéshez vezető elgondolást egymástól függetlenül először Rice és Cserepanov publikálta 1968, ill. 1967 években [33, 34]. Igazolható, hogy a J-integrál értéke zérus abban az esetben, ha a



36. ábra. A J-integrál koncepciója

görbe zárt, tehát nem repedés vagy belső folytonossági hiba két felületén végződik. Belátható az is, hogy

$$J = \frac{dE}{da} \quad (51)$$

azaz a J-integrál a testben tárolt energia csökkenését tükrözi miközben a repedéshossz da értékkel növekszik.

A (49) és (51) kifejezések alakilag azonosak, azonban fizikai tartalmukat tekintve alapvetően eltérnek. A (49) összefüggés azt tükrözi, hogy ha egy rugalmas testben levő repedészerű hiba felületére merőlegesen σ átlagfeszültség hat, akkor a repedésfelületek kinyílása által a testben tárolt rugalmas energia megváltozása – a repedéshossz növekedésével – megegyezik a növekedés során a repedés csúcsánál felszabaduló energiával. Az (51) kifejezés is az utóbbit tükrözi, de a repedéscsúcs tetszőleges környezetében (hisz az integrál értéke a C-görbétől független) az alakváltozások és feszültségek kapcsolata a Hooke-törvénytől eltérően ebben az esetben nem lineárisan (pl. hatvány szerint keményedő).

A J-integrál gyakorlati alkalmazhatóságához két dologra van szükség. Egyrészt ismerni kell a J-integrál kritikus értékét, azaz az anyagnak azt a tulajdonságát, jellemzőjét, amelyet a repedés terjedésével szemben kifejt, másrészt egy reális szerkezet tényleges terheléséből kiindulva, ki kell tudnunk számítani a reális repedés környezetében a (50) összefüggés felhasználásával a J konkrét értékét. Ez utóbbi a mechanika numerikus eljárásainak alkalmazásával oldható meg, az anyagjellemző kísérleti módszerekkel meghatározható, tehát a módszer gyakorlati alkalmazásának elvileg nincs akadálya. Csúpn két korlátozó tényezőt kell figyelembe venni. Az egyik az, hogy csak síkbeli viszonyokra alkalmazható, a másik pedig, hogy tetszőleges terhelésnél a repedés terjedés iránya nem jelölhető ki.

A törésmechanika mérnöki módszerei

2a. A fajlagos repedésterjesztési erő koncepciója

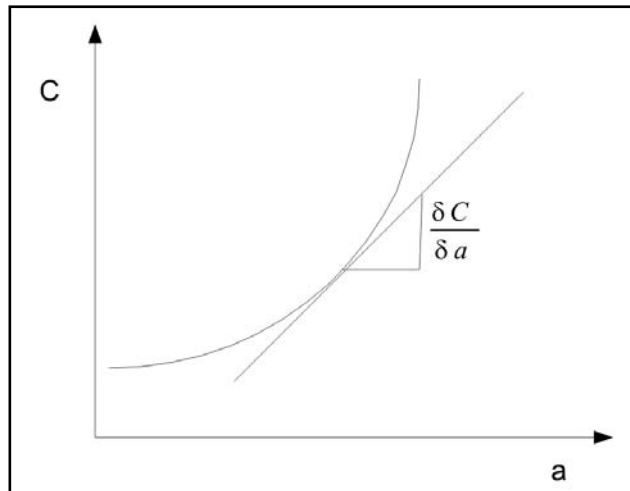
Egy repedést tartalmazó szerkezetet külső erővel (P) terhelve abban alakváltozási energia (U) halmozódik fel. A endszer merevsége (a rugóállandó reciproka) $C=\delta/P$ kifejezéssel definiálható, ahol δ – az erő (P) hatásvonalába eső elmozdulás. A rendszerben tárolt energia

$$U = \frac{1}{2} P\delta = \frac{1}{2} CP^2 \quad (52)$$

Amennyiben a szerkezet repedést tartalmaz és a repedés egy adott terhelésnél (P_{krit}) megmozdul, növekszik a szerkezet merevsége is megváltozik. A repedés terjedéssel szembeni ellenállást a $\delta U/\delta a$ mennyiség fogja jellemezni. Ezt a mennyiséget vezette be George Irwin,

mint repedésterjesztési erőt és G -vel jelölte (felesége neve Georgina, így nem állítható biztosan, hogy a George vagy a Georgina név kezdőbetűje a G jelölés). A g értelmezését a 37. ábra segíti.

$$G = \frac{\delta U}{\delta a} = \frac{1}{2} P^2 \frac{\delta C}{\delta a} \quad (53)$$



37. ábra. A merevség (compliance – C) megváltozása a repedéshossz függvényében

Az anyagjellemző (a repedésterjedéssel szembeni ellenállás) meghatározása során repedést tartalmazó próbatestre van szükség, amelyet terhelve a kritikus terhelés meghatározható. Ekkor a G_{krit} értéke a következő kifejezéssel számítható

$$G_{krit} = \frac{1}{2} P_{krit}^2 \frac{\delta C}{\delta a} \Big|_{a=a_{krit}} \quad (54)$$

Gyakorlatilag minden próbatest merevsége számítható a rugalmasságtan elveinek figyelembevételével.

2.b. Fajlagos törésmunka koncepciója

Gillemot László (1912. 10. 07. – 1977.08.20.), 38. ábra, akadémiai székfoglaló előadásában (1966. 01. 25.) adott részletes áttekintés, foglalta össze [35] az először 1958-ban Sinay Gáborral közösen publikált [36] elképzelést, amely „kontrakciós munka”, „fajlagos alakváltozási munka”, ill. „fajlagos törésmunka” kifejezésekkel honosítottak meg a hazai szakirodalomban. A módszer lényege az, hogy egy sima hengeres próbatest szakítóvizsgálata során az erő-átmérő változás ($F - \Delta d$) folyamatos regisztrálását a kontrahált keresztmetszetben valósítják meg. Ekkor a kontrakció helyén kiválasztott egységnyi térfogatban elnyelt munka a 39. ábrán látható jelölések figyelembevételével számítható a következő összefüggéssel

$$W_{krit} = \int_0^{\varphi_u} \sigma \cdot d\varphi \quad (55)$$

ahol

W_{krit} – az előzőekben említett „kontrakciós munka”, „fajlagos alakváltozási munka”, ill. „fajlagos törésmunka” (J/m^3)

φ – a valódi alakváltozás, amely hengeres próbatest esetén a $\varphi = 2 \ln \frac{d_0}{d} = 2 \ln \frac{d_0}{d_0 - \Delta d}$ kifejezéssel meghatározható (d_0 a

próbatest eredeti átmérője, d – a terhelés közben mért pillanatnyi átmérő, Δd az átmérő csökkenése a terhelés során,

φ_u – a szakadás pillanatában

mért valódi alakváltozás

σ' – a próbatestben ébredő valódi feszültség.

Történelmi tényként kell megemlíteni, hogy Rejtő Sándor „szívóssági mérőszám”-

(Rejtő-féle szívóssági munka, Záhigkei, tenacity) vezette be a mérnöki feszültség–mérnöki megnyúlás ($\sigma - \delta$) görbének az egyenletes nyúlás határáig tartó területét. Ez a terület természetesen lényegesen kisebb és hozzávetőlegesen a repedés keletkezéséhez szükséges munkát definiálja (abban az esetben, ha elfogadjuk, hogy a terjedőképes repedés a hengeres próbatest középvonalában a maximális, a képlékeny instabilitáshoz tartozó erőnél keletkezik).

A javasolt módszer kétségbevonhatatlan előnyei:

- egyszerű, gyors és akár a tradicionális szakító vizsgálatokból is becsülhető,
- különböző megfontolások alapján számos olyan összefüggés ismeretes, amelyekben a tradicionális szakítóvizsgálattal meghatározott paraméterek szerepelnek,
- a fajlagos törésmunka kiváló mérőszáma az anyagok bemetszés érzékenységének számszerű jellemzésére
- a fajlagos törésmunka és a törésmechanikai mérőszámok kapcsolata megteremthető (lásd. Czoboly Ernő – Havas István közleményét).

A koncepció hátrányai:

- a fajlagos törésmunka a repedés keletkezésének és terjesztésének együttes energiáját fejezi ki,
- a próbatest alakjának szerepe kérdéses,
- a próbatest méreteinek hatása, az úgynevezett mérethatás nem kellő mélységben tisztázott.

A hazánkban széles körben elterjedt koncepció alkalmazásában úttörő munkát végeztek:

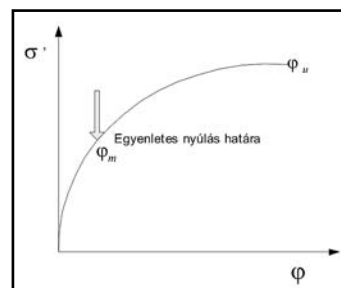
- Konkoly Tibor a hegesztőanyagok (és varratanyagok) bemetszés érzékenységének jellemzésével,
- Gillemot Ferenc a kisciklusú fáradási anyagjellemzők becslésében,
- Czoboly Ernő és Havas István a törésmechanikai anyagjellemzők a fajlagos törésmunka közötti híd kimunkálásában,
- Tóth László a fajlagos törésmunka és az anyagok fáradásos repedésterjedéssel szembeni ellenállásának becslésében. A sin acélokat (66 adag), nagyszilárdságú hegeszthető acélokat (NAXTRA, bainites és ferrint-perlites), betétben edzhető és austenites Cr-Ni acélokat magába foglaló 18 különböző anyagon végzett vizsgálatok alapján a sima hengeres próbatesteken meghatározott fajlagos törésmunka (W_0) és a $da/dN = C(\Delta K)^n$ úgynevezett Pari-Erdogan kifejezés kitevője (n) között az alábbi korrelációs összefüggést kaptuk [37-43]:

$$n = (5,652 \pm 0,1168) - (0,00168 \pm 0,0001) W_0 \quad (56)$$

2.c. Biztonsági diagram típusú koncepciók

A folyási határ alatti feszültségeken végbemenő teljes egészében rideg törés a lineárisan rugalmas törésmechanikai apparátussal kezelhetővé és kiküszöbölhetővé vált a 1980-as évek végére. Ezt követően a törésmechanika fejlődését a következő körülmények inicializálták:

- Mennyi a repedést tartalmazó szerkezet biztonsági tartaléka akkor, ha nem tökéletesen ridegen megy végbe a törés?
- A mikroelektronika, és ezzel együtt a roncsolásmentes vizsgálati technikák robbanásszerű fejlődésével ugrásszerűen megnőtt a feltárt



39. ábra. A Gillemot-féle fajlagos törésmunka értelmezése

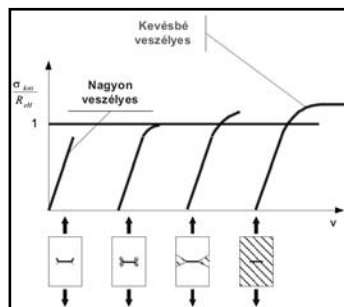


38. ábra. Gillemot László (1912. 10. 07. – 1977. 08. 20.)

anyagfolytonossági (a repedésszerű) hibák száma. Ilyenkor mindig felmerül az a kérdés, hogy milyen módszerekkel és hogyan becsülhetők a szerkezetek biztonsága?

• Hogyan és milyen eszközökkel, módszerekkel értékelhetők egységesen a mi-nimális energiaelnyelődéssel végbemenő rideg- (azaz nagyon veszélyes) és a jelentős képlékeny alakváltozással, a számottevő energia-elnyelődéssel járó (kevésbé veszélyes) képlékeny összeomlással lejártszódó törések, mint ahogy ezt a 41. ábra szemlélteti?

Az kétségtelen tény, hogy a lineárisan rugalmas törésmechanikai (LEFM) módszerek megbízhatóan kezelik a kifejezetten ridegen végbemenő, a legveszélyesebb törési eseteket annak dacára, hogy az alkalmazott megfontolások éppen a repedéscsúcsban elvileg nem helytállóak. Ha viszont a már említett Saint-Venant elvet figyelembe vesszük, akkor azt mondhatjuk, hogy jó, a repedéscsúcsban az elvek nem helytállóak, de kicsit távolabb, már nem érvényesülnek a lokális hatások. Ez mindenképpen egy nagyon érdekes és figyelemre méltó megállapítás, de igaz (vagy majdnem igaz). Egy kissé morbid példával élve: Azt pontosan nem tudjuk, hogy miképpen szűnik meg egy-egy élet, de azt regisztrálni tudjuk, hogy beállt a halál! Az is igaz, hogy a LEFM elveit használjuk akkor is, ha már egzakt módon nem érvényesülnek a modellalkotásnál tett feltételezések. Ilyenkor a határok kijelölése (meddig lehet még alkalmazni és mettől már nem alkalmazható) szakmai megegyezés kérdése. Ezt a szakmai közösség megtette és megállapodásukat szabványok, műszaki dokumentumok rögzítik. Az is tény, hogy amennyiben a repedéscsúcs környezetében az anyag számottevő képlékeny alakváltozást szenved (másképpen fogalmazva: a terhelés során bevitt alakváltozási energia egyre nagyobb hányada képlékeny alakváltozást idéz elő, és csak kisebb hányada fordítható a repedés terjesztésére – a törésre) az eddigiekben alkalmazott rugalmassági elvek nem használhatók. Ilyenkor helyükbe lépnek a képlékenységtan elvei, amelyekben megszűnik a linearitás, és additivitás, és ezzel együtt az anyag viselkedésében szerepet kap az úgynevezett mérethatás. a méretektől való függés. Ezekben az esetekben is kidolgozhatók olyan elvek, amelyek a szerkezetekben levő repedések veszélyességének mérlegelésére alkalmasak, de a nagyméretű próbatesten, valóságos szerkezeteken megvalósított kísérleti ellenőrzések nem kerülhetők meg. Ezen típusú, az üzemeltethetőségre vonatkozó alkalmasság eldöntésére dolgozták ki a '90-es években a 41. ábrán látható, és annak inkább a második felében az úgynevezett „biztonsági diagram” típusú értékelési eljárásokat. A kifáradás témakörében széles körben ismertek a biztonsági diagramok, amelyek gyakorlatilag egy adott anyag kifáradási határainak összessége, amelyek egy adott terhelési mód (húzás-nyomás, vagy hajlítás, vagy csavarás) bármilyen nagyságú terhelése kapcsán kiküszöböli a kifáradással bekövetkező törést. A legveszélyesebb, a 40. ábra baloldali részén látható úgynevezett ridegtörés esetét a 41. ábra függőleges tengelye, a legveszélyetlenebbet, a 40. ábra jobb oldalán látható esetet a 41. ábra vízszintes tengelye, a „képlékeny összeomlás” írja le. A kettő közötti lehetséges eseteket pedig valamilyen határgörbe. A legnagyobb problémát a határgörbe definiálása jelenti, hiszen ennek kapcsán sok-sok megalapozott szakmai kérdés vetődik fel, pl. hogyan függ a határgörbe

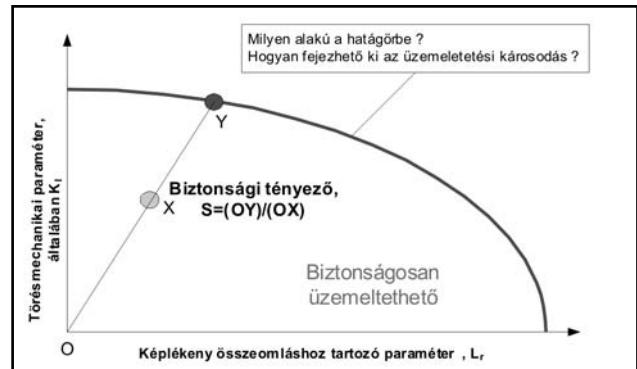


40. ábra. A repedést tartalmazó szerkezeti elem megnyúlása (v) a repedésterjedéshez tartozó kritikus feszültség (σ_{krit}) és a folyási határ (ReH) arányában a különböző, lehetséges törési eseteknél

- az anyag minőségétől,
- az anyagnak az üzemeltetés során bekövetkező károsodásának típusától és folyamatától,

- a szerkezet méreteitől,
- a szerkezetben levő repedés relatív méretétől stb.

A nagyméretű szerkezeteket gyártó és üzemeltető (atomerőművek, hőerőművek hajóépítő ipar, stb.) világcégek igen jelentős forrásokat biztosítottak az 1990-es években a 41. ábrán látható koncepció határgörbéinek kidolgozására és ezek ellenőrzésére. Így születtek a meg a biztonságos üzemeltetést szolgáló, szabványokban és műszaki előírásokban megtestesülő, úgynevezett FFS (Fitness for Service) eljárások mind az atomerőmű-ipar, mind pedig a normál mérnöki szerkezeteket gyártó, üzemeltető iparágak számára. Ezeket foglalja össze a nem nukleáris területeken az 1. táblázat és a nukleáris iparban alkalmazottakat a 2. táblázat.



41. ábra. „Biztonsági diagram” típusú, üzemre való alkalmasság (fitness for service, fitness for purpose) becslések alapdiagramja

1. táblázat

FFS típusú értékelési módszerek a NEM NUKLEÁRIS iparban

Eljárás	Szerkezeti elem	Ország	Bevezetés éve
BS 7910	Fémszerkezetek	GB	2005
SINTAP	Fémszerkezetek	EU	2004
FITNET	Fémszerkezetek	EU	2008
R5	Növelt hőmérsékletű üzemelés	GB	1994
API 579	Olajipar, Finomítók	USA	2000
WES 2805	Kötőhegesztések	JPN	1997

2. táblázat

FFS típusú értékelési módszerek a NUKLEÁRIS iparban

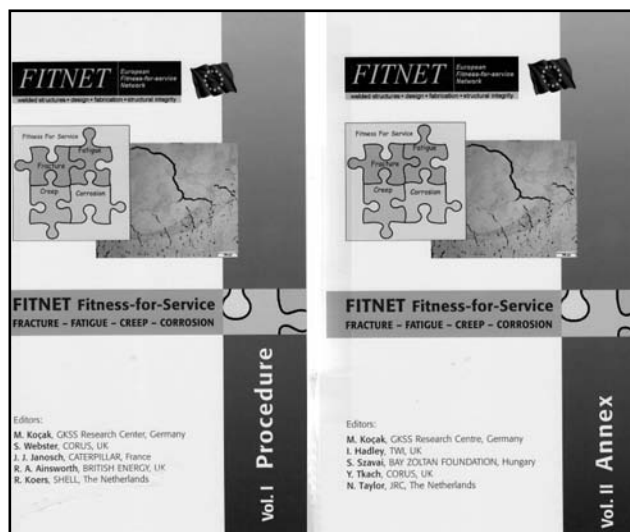
Eljárás	Szerkezeti elem	Ország	Bevezetés éve
ASME Sec.XI.	NC	USA	2004
RSE-M	NC	FR	1997
A16 (RCC-MR)	NC	FR	2002
SKIFS	NC	SWE	1996
KTA 3201.4	NC	EU	1999
JSME S NAI	NC	JPN	2004
R6	NC	GB	2001

Az 1. és 2. táblázat adataiból látható, hogy

- az eddig kidolgozott 13 eljárás közül mindössze 5 db készült 1994-2000 között és 8 db az ezredforduló után,
- az eljárások kidolgozásához szükséges forrásokat alapvetően az USA, Anglia, Franciaország, Japán és az Európai Unió biztosította.

Említésre méltó tény, hogy az EU 6. Keretprogramjában 1.765.000 Euro-val támogatott FITNET hálózatban kidolgozott eljárást az EU tagállamaiból mintegy 40 partner hozta létre, amelyben a volt szocialista országok közül egyedül hazánk vett részt, a Bay Zoltán Logisztikai és

Gyártástechnikai Intézet képviselőjében. A kidolgozott 2 kötetben publikált anyagot a 42. ábra szemlélteti.

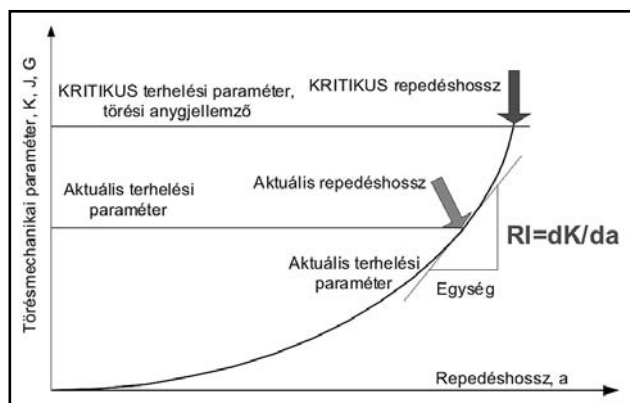


42. ábra. A FITNES program keretében kidolgozott értékelési eljárásrend anyaga (kidolgozásában a BAY-LOGI munkatársai is jelentős szerepet vállaltak)

A törésmechanika röviden áttekintett fejlődési trendje egyben kikényszerítette olyan roncsolásmentes vizsgálati módszer kifejlesztését és ipari bevezetését, amely alkalmas a szerkezetekben esetlegesen levő repedésszerű hibák méretének és elhelyezkedésének megbízható detektálását. Hogy ez mennyire így van, arról meggyőződhetünk a különböző roncsolásmentes vizsgálatok ipari bevezetéséhez kötődő időpontok alábbi áttekintéséből is:

- 1876 Mágneses mező vizsgálata, A. HERING (USA)
- 1895 Röntgenvizsgálat, Wilhelm Conrad RÖNTGEN (D)
- 1925 γ -sugárzás, H. PILON, M.A. LABORDE (F)
- 1927 Mágnesporos vizsgálat, A. ROUX (F)
- 1929 Elektropotenciál és, E.A. SPERRY (USA)
- 1933 Folyadékbehatolásos vizsgálat, H. REICHERT (D)
- 1936 Örvényáramos vizsgálat, F. FÖRSTER (D)
- 1936 Akusztikus emissziós vizsgálat, F. FÖRSTER (D)
- 1942 Ultrahangos vizsgálat, Floyd A. FILESTONE (USA)
- 1997 Fáziseltolódásos UH vizsgálat (Tomscan FOCUS)

A felsorolásból látható, hogy 1942 és 1977 között igazában új elveket felhasználó módszer nem jelent meg az ipari alkalmazások között. Az egészségügy területén a '70-es évek elején bevezetett módszer mérnöki



43. ábra. A repedésérzékenységi index definíciója.

területeken való alkalmazását nagyban segítette a mikroelektronika hihetetlen ütemű fejlődése.

Igen lényeges kérdés a szerkezet biztonsági tényezőjének direkt összekapcsolása a roncsolásmentes anyagvizsgálat megbízhatóságával, a repedésgeometria detektálásának bizonytalanságával. Erre nézve került bevezetésre világviszonylatban elsőként a *repedésérzékenységi index* fogalma. ennek lényegét szemlélteti 43. ábra. E koncepció és gyakorlati alkalmazhatósága számos közleményben került bemutatásra pl. 44-53.

Anyagok repedésterjedéssel szembeni ellenállása és meghatározási módszerei

Ahhoz, hogy a törésmechanikai elveket igen széles körben alkalmazni lehessen elengedhetetlen szükségesség az anyagok repedésterjedéssel szembeni ellenállásának ismerete a gyakorlatban előforduló anyagokra és terhelési, üzemeltetési feltételekre. Bármelyik törésmechanikai modellt is tekintem a gyakorlati alkalmazáshoz a következőkre van szükségem:

- a repedésszerű hiba megbízható detektálási módszerére, a vizsgálati eljárásra,
- a repedésszerű hiba közvetlen környezetében kialakuló mező(k) számítására a terhelés, a szerkezet és a hiba geometria paramétereinek figyelembevételével,
- a mező jellemzésére egyetlen, úgynevezett eredő-paraméterrel (lásd pl. a kontinuummechanikában az eredő feszültség, egyenértékű feszültség fogalmát stb.)
- az anyag adott állapotában a repedésterjedéssel szembeni ellenállását, amely természetesen valamilyen módon meghatározható a specifikus (partikuláris) terhelési módokban mért törési jellemzőkből.

A legegyszerűbb, a lineárisan rugalmas törésmechanikát tekintve, ahol az addíció elve is érvényesül, azaz a terhelés módjától függően K_I , K_{II} -ről és K_{III} -ról, ill. az anyagjellemzők tekintetében az adott terhelési módhoz tartozó repedésterjedési ellenállásról, törési szívósságról K_{Ic} , K_{IIc} -ről és K_{IIIc} -ről beszélhetünk. Ekkor szükség van egy olyan felületre, annak egyenletére, amely alatt a repedést tartalmazó szerkezet biztonsággal üzemeltethető, ill. amely felett, az instabil repedésterjedés valósul meg. Az

$$F(K_I, K_{II}, K_{III}, K_{Ic}, K_{IIc}, K_{IIIc}) = 0 \quad (57)$$

felület kísérleti meghatározása. Ha az instabil repedésterjedés Griffith-féle kritériumát elfogadjuk, akkor bizonyítható, hogy általános térbeli terhelésnél az instabil repedésterjedés akkor indul meg, ha a következő feltétel teljesül:

$$F(K_I, K_{II}, K_{III}) = 4G\gamma - \left(\frac{m-1}{m}\right)(K_I^2 + K_{II}^2) - K_{III}^2 \quad (58)$$

ahol

G – a csúsztató rugalmassági modulus,

$m=1/\mu$, ahol μ – a Poisson szám,

γ – az egységnyi új felület létrehozásához szükséges energia.

Síkbeli esetekre törési kritériumként az úgynevezett gömbi feltételt

$$\left(\frac{K_I}{K_{Ic}}\right)^2 + \left(\frac{K_{II}}{K_{IIc}}\right)^2 = 1 \quad (58)$$

vagy az úgynevezett elliptikus feltételt

$$(K_I)^2 + 1,78(K_{II})^2 = (K_{Ic})^2 \quad (59)$$

szokták törési kritériumként elfogadni.

Érdeemes megemlíteni, hogy a legegyszerűbb terhelés esetre, az I. terhelési módra (a feszültség merőleges a repedés síkjára) a törési szívósság meghatározására a világon az első szabvány csupán 1983-ban jelent meg, amelyet az ASTM E 399-el jelölt. Ez szolgált alapul a további szabványosításoknak, annak ellenére, hogy számos alkalommal átdolgozásra, pontosításokra került [54]:

- 2009(E1) kiadás – Május 1, 2010
- 2009 kiadás – Július 1, 2009
- 2008 kiadás – November 15, 2008
- 2006(E2) kiadás – Április 1, 2008
- 2006(E1) kiadás – Április 1, 2007
- 2006 kiadás – December 15, 2006
- 2005 kiadás – Április 1, 2005
- 1990 R97 kiadás – November 30, 1990
- 1990 kiadás – November 30, 1990
- 1983 kiadás – Április 24, 1983

Az ismétlődő terhelés során végbemenő repedésterjedésnél a következő két problémával került szembe a szakmai közvélemény:

- milyen legyen az alkalmazott modell, és
- milyen módszerekkel határozzák meg az anyagok repedésterjedéssel szembeni ellenállását.

Noha Paul Paris már 1961-ben javasolta a mára már abszolút széles körben elfogadott modelljét (amelyet a beküldött cikk bírálói egyértelműen elutasítottak [3]) az anyagjellemzők mérésére az első szabvány csupán 1988-ban jelent meg, amelyet azóta ugyancsak többször módosítottak

- 2011 kiadás – Július 15, 2011
- 2008(E1) kiadás – Május 1, 2010
- 2008 kiadás – Április 1, 2008
- 2005 kiadás – Június 15, 2005
- 2000 kiadás – December 10, 2000
- 1999 kiadás – Január 1, 1999
- 1995 kiadás – Október 10, 1995
- 1995 kiadás – Január 1, 1995
- 1993 kiadás – Február 15, 1993
- 1991 kiadás – Április 15, 1991
- 1988A kiadás – November 29, 1988

A növelt hőmérsékletű kúszás során végbemenő stabil repedésterjedés körülményeinek elemzése kapcsán ugyancsak felmerült a modell és az anyagjellemző kísérleti meghatározásának problematikája. E területen csupán 1992-ben jelent meg az első szabvány, amelyet folyamatosan pontosítottak

- 2007(E3) kiadás – Május 1, 2011
- 2007(E2) kiadás – Október 1, 2009
- 2007(E1) kiadás – Augusztus 1, 2008
- 2007 kiadás – Március 15, 2007
- 2000 kiadás – Augusztus 10, 2000
- 1998 kiadás – Március 10, 1998
- 1992 kiadás – Február 15, 1992

Az anyagok repedésterjedéssel szembeni ellenállást tükröző legkülönbözőbb anyagjellemzők kísérleti meghatározására ma már a szabványosított módszerek széles köre áll rendelkezésre. Teljesen önkényesen kiválasztva álljon itt a következő néhány szabvány az ASTM repertoárjából (az angol címetek megtartva)

- ASTM E399 – 09e2 Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{Ic} of Metallic Materials
- ASTM E1820 – 11 Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness
- ASTM D5045 – 99(2007)e1 Standard Test Methods for Plane-Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials
- STM E2472 – 06e1 Standard Test Method for Determination of Resistance to Stable Crack Extension under Low-Constraint Conditions
- ASTM E1457 – 07e4 Standard Test Method for Measurement of Creep Crack Growth Times in Metals
- ASTM E2760 – 10e1 Standard Test Method for Creep-Fatigue Crack Growth Testing
- ASTM E1290 – 08e1 Standard Test Method for Crack-Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement

- ASTM D6068 – 10 Standard Test Method for Determining J-R Curves of Plastic Materials
- ASTM E647 – 11e1 Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates

Összefoglalóan tehát azt mondhatjuk, hogy anyagvizsgálati oldalról is rendelkezésre áll napjainkban olyan széles vizsgálat-metodológiai háttér, amely lehetővé teszi a repedést tartalmazó szerkezetek biztonságának megítélését az anyagvizsgálat oldaláról.

Melyik modellt válasszam és miért?

Az előzőekben röviden áttekintett tények alapján a következők jelenthetők ki:

- a rugalmasságtan alapegyenletein nyugvó síkbeli esetekre vonatkozóan elméletileg megalapozott modellek állnak rendelkezésre a lineárisan rugalmas törésmechanika eszköztárában,
- a repedéscsúcsban ébredő feszültségintenzitási tényező számítására kézikönyvekben, szoftverekben, INTERNET-es adatbázisokban, on-line programokban összefoglalt számítási módszerek állnak rendelkezésre a legkülönbözőbb szerkezeti elemekben, a gyakorlatban előforduló terhelési esetekre, hiba-konfigurációkra,
- matematikailag megalapozott, elméletileg helyes módszerek állnak rendelkezésre a technológiai maradó feszültségek (hegesztés, hőkezelés, stb.) figyelembevételével ébredő feszültségintenzitási tényező számítására,
- nincs egyértelmű, kísérletileg igazolt módszer az eredő törésmechanikai paraméter számítására térbeli, összetett igénybevétel esetén, annak ellenére, hogy számos kecsegtető javaslat található a szakirodalomban,
- nincs egyértelmű, kísérletileg igazolt törési kritérium térbeli terhelés esetére még a LEFM alkalmazásánál sem,
- rendelkezésre állnak mindazon anyagvizsgálati szabványok, amelyek lehetővé teszik a különböző törésmechanikai modellekben szereplő anyagi paraméterek (repedésterjedéssel szembeni ellenállás) reprodukálható mérését,
- kidolgozásra kerültek olyan úgynevezett mérnöki megoldások, amelyek képesek értékelni a repedést tartalmazó szerkezetek biztonságát a lehetséges törési esetek igen széles tartományában a teljesen ridegtől a képlékeny összeomlásig.

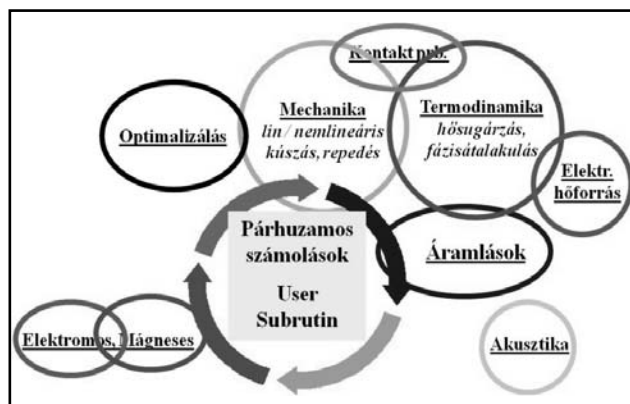
Az előzők figyelembevételével jogos kérdés az, hogy milyen modellt válasszak és miért? Ennek mérlegelése kapcsán a következő stratégiát célszerű minden esetben követni:

Mindig a legkonzervatívabbal kezdjem az értékelést, hiszen ha a konzervatív becslés mellett a szerkezet biztonságosan üzemeltethető, akkor nincs értelme a további számításoknak! Ebből a megfontolásból feszültségintenzitási tényezőre alapozott **lineárisan rugalmas törésmechanika** a szóba jöhető módszer, hiszen ebben a modellben csak egyetlen energia-nyelő van és ez a repedéscsúcs környezete!

Létezzen roncsolásmentes vizsgálati módszer a repedésszerű hiba MÉRLETEINEK, ELHELYZKEDÉSÉNEK meghatározására. A fáziseltolódásos ultrahangvizsgálat megfelelő eljárás.

Ki tudjuk számítani a repedés környezetében kialakuló törésmechanikai paramétert. A feszültségintenzitási tényezőre alapozott koncepció alkalmazásánál a repedéscsúcsban ébredő viszonyok számítására kézikönyvekben, szoftverekben, INTERNET-es adatbázisokban, on-line programokban összefoglalt módszerek állnak rendelkezésre a legkülönbözőbb szerkezeti elemekben, a gyakorlatban előforduló terhelési esetekre, hiba-konfigurációkra. Ugyancsak matematikailag megalapozott, elméletileg helyes módszerek állnak rendelkezésre a technológiai maradó feszültségek (hegesztés, hőkezelés, stb.) figyelembevételére is. A számítástechnika jelenlegi szintje gyakorlatilag lehetővé teszi bármilyen konfigurációban a szükséges számítások elvégzését. Ezt illusztrálja a 44. ábra.

Legyen szabványosított vizsgálati módszer a repedésterjedéssel szembeni ellenállás meghatározására. Mint láttuk, erre nézve igen



44. ábra. A számítástechnika adta lehetőségek a gyakorlatban előforduló, a mérnöki szerkezetekben ébredő mezők numerikus szimulálására

széles és szabványosított paletta áll rendelkezésre. E módszerekkel meghatározott anyagjellemzőket napjainkban ingyenes vagy fizetős on-line adatbázisokban is összefoglalják, pl. 55.

Visszatérve tehát az alapkérdéshez: a melyik modellt válasszam és miért? A személyes vélemény:

A konzervatív becslést jelentő lineárisan rugalmas törésmechanikát, mert

- az alkalmazásához szükséges feszültségintenzitási tényező számítására a háttér adott kézikönyvekben, on-line adatbázisokban, egyszerű on-line szoftverekben vagy számítógépes kódokban,

- matematikailag megalapozott módon a „súlyfüggvények” módszerével becsülhetők a technológiai maradó feszültségek várható szerepe,

- az anyagjellemzők reprodukálható kísérleti meghatározására a szabványosított eljárások léteznek, ill. tájékoztató adatok rendelkezésre állnak kézikönyvekben vagy on-line ingyenes vagy fizetős adatbázisokban.

Amennyiben a konzervatív módszer alkalmazásával a repedést tartalmazó szerkezetek biztonságosan üzemeltethetők, úgy a további számítások feleslegesek, hiszen a repedésterjedéssel, töréssel járó esetleges képlékeny alakváltozások csak a biztonságot növelik.

Amennyiben a konzervatív módszer alkalmazásával a repedést tartalmazó szerkezetek biztonságosan NEM üzemeltethetők, úgy a további számításokat a napjainkra már széles körben kidolgozott és kísérletileg ellenőrzött (verifikált) FFS eljárásokra kell alapozni, amelyek megalapozottan használhatók mind a nukleáris, mind pedig a nem-nukleáris iparban egyaránt.

Összefoglalás, következtetések

A közlemény célkitűzését, az áttekintett területeket, azok eredményeit áttekintve a következő megállapítások tehetők:

A lineárisan rugalmas anyamodellre alapozott törésmechanika **matematikai elmélete** a síkbeli feladatokra az 1960-as évekre került teljes mértékben kidolgozásra.

Ezt megelőzően az 1940-es és 50-es években a törésmechanikai elvek kidolgozásával párhuzamosan megkezdődtek a repedésszerű hibákat tartalmazó szerkezetek biztonságának megítéléséhez kötődő mérnöki, gyakorlati módszerek kidolgozása és alkalmazása. Erre az időre a gyakorlat-elmélet kölcsönhatása jellemző elsősorban az úgynevezett „repedéscsúcs-modellek” elmélete és gyakorlati alkalmazhatósága tekintetében.

Az 1960-as évek második felében az úgynevezett „súlyfüggvények-módszerének” bevezetésével elvileg lehetővé vált a technológiai maradó feszültségek hatásának elemzése a repedésterjedés körülményeiben.

Az 1970-es években a lineárisan rugalmas törésmechanika gyakorlati alkalmazását közvetlenül elősegítő feszültségintenzitási tényező

számítására vonatkozó összefüggések tömegszerűen kidolgozásra kerültek.

Az anyagok repedésterjedéssel szembeni ellenállásának vizsgálati szabványai is megjelentek az 1980-as évektől kezdődően (1983, 1988, 1992).

Az 1990-es évek második felében ipari alkalmazásként megjelent a repedésszerű hibák térbeli detektálására alkalmas fáziseltolódásos ultrahangvizsgálat.

A 2000-es évek elejétől a szakmai közvélemény érdeklődési köre a törések széles tartományát (a ridegtöréstől – a képlékeny összeomlást) értékelő módszerek kidolgozására koncentrált. Ennek eredményeként számos, úgynevezett „biztonsági-diagram” típusú eljárás született mind a nukleáris, mind pedig a nem-nukleáris iparágak számára.

Napjainkban elmondható, hogy a számítástechnikai háttérre támaszkodó elméleti és gyakorlati ismeretek lehetővé teszik a szerkezetekben levő és a vizsgálati technika fejlődése miatt egyre gyakrabban detektált repedésszerű hibák várható hatásának megbízható mérlegelését. Ennek során egyrészt az elemzés módját és költségeit kell figyelembe venni! A módot illetően célszerű a konzervatív (csak a repedés közvetlen csúcsában van energia-elnyelődés) eljárással kezdeni és a „biztonsági-diagram” típusúval folytatni, a költségeket illetően pedig a kockázat alapú szemléletre támaszkodni. Ez ugyanis a biztonság szintjének megítélésére befektetett és a kockázatot összegeket mérlegeli.

Összefoglalóan megállapítható, hogy a Czoboly Ernő által 1977-ben készített tudományterületi áttekintés 56 egyrészt helyesen jelölte ki a várható fejlődési irányokat, másrészt a mikroelektronika és az ezzel együtt járó vizsgálati- és számítástechnikai háttér olyan fejlődéseket inicializált, amelyek napjainkra lehetővé tették a szerkezetekben levő repedésszerű hibák várható hatásának széleskörű, „mi van akkor, ha típusú” megbízható mérlegelését.

Irodalomjegyzék

- [1] BÉDA Gy., KOZÁK I., VERHÁS J.: Kontinuummechanika. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1986.
- [2] BOJTÁR I.: http://www.epito.bme.hu/me/htdocs/oktatas/tantargy.php?tantargy_azon=BMEOTMMBT4 lapon a „Letölthető fájlok” között a „Kiegészítő információk” könyvtárban szereplő életrajzok.
- [3] TÓTH L., ROSSMANIETH P.: A törésmechanika és az anyagvizsgálat története. Miskolc, 1999. <http://mek.oszk.hu/01100/01191/cimkes.html>
- [4] CHEREPANOV G.P.: Mekhanika khрупkogo razrusheniya. Nauka. Moszkva, 1974. 144-149.
- [5] KOVÁCS L.: Orowan Egon szilárdtestfizikus születésének centenáriuma. Magyar Tudomány. 2002/3. p. 372-375.
- [6] NABARRO F.R.N., ARGON A.S.: Egon Orowan. Biographical Memoir. National Academies Press. Washington D.C. 1996. <http://www.nap.edu/html/biomems/eorowan.pdf>
- [7] OROWAN E.: Energy criteria of fracture. Welding Research Supplement. 1955. p.157-160.
- [8] ROSSMANIETH P.: Fracture Research in Retrospect: An Anniversary Volume in Honour of G.R.Irwin's 90th Birthday. A. A. Balkema Publishers. 1997.
- [9] GÁSPÁR Gy.: Műszaki matematika. VI. kötet. Komplex függvénytan. Tankönyvkiadó. 1969. p.101.
- [10] <http://www4.ncsu.edu/~njrose/Special/Bios/Sneddon.html>
- [11] SANFORD R.J.: Selected papers on crack tip stress fields. SEM Classic Papers, Volume CP2, SPIE Milestone Series. Volume MS 138. 1997.
- [12] SIH G.: Handbook of stress-intensity factors: stress-intensity solutions and formulas for reference. Leigh University, institute of Fracture and Solid Mechanics, 1973
- [13] SIH G.: Plates and shells with cracks: a collection of stress intensity

- factor solutions for cracks in plate and shells. Noordhoff International, 1977
- [14] Tada H, Paris P.C. and Irwin G.R.: The Stress Analysis of Cracks Handbook. Del Research Corp., Hellertown, Pa., U.S.A. 1973.
- [15] Rooke, D.P., Cartwright D.J.: Compendium of Stress Intensity Factors. Her Majesty's Stationery Office, London. 1976.
- [16] Stress Intensity Factors Handbook. Edited by Y. Murakami, Pergamon Press. 1986-2001 (1-5 kötet)
- [17] Aliabadi M.H.: Database of Stress intensity Factors. Computational Mechanics Publications.
- [18] Panasyuk V.V., Szavruk M.P.: Fracture Mechanics and Strength of Materials. Volume 2. Kiev. 1988
- [19] Wu X. R., Carlsson A. J.: Weight Functions and Stress Intensity Factors Solutions, Pergamon Press. Oxford. 1991
- [20] Fett T., Munz D.: Stress Intensity Factors and Weight Functions. International Series On Advances in Fracture. Wessex Institute of Technology. Computational Mechanics Publications, 1997.
- [21] Sih G. C.: Some Basic Problems in Fracture Mechanics and New Concepts. Engineering Fracture Mechanics. Vol.5. 1973. p.229-234.
- [22] Barenblatt G. I.: O ravnesnykh treshhinakh, obrazujushchisja pri khrupkom razrushhenii. Obshhie predstavlenija i gipotezy. Osimmetrichnye treshhiny. Prikladnaja Matematika i Mekhanika. 1959. Vol. 23. vyp. 3. p.434-444.
- [23] Barenblatt G. I.: O ravnesnykh treshhinakh, obrazujushchisja pri khrupkom razrushhenii. Prjamolinejnye treshhiny v ploskikh plastinkakh. Prikladnaja Matematika i Mekhanika. 1959. Vol. 23. vyp. 4. p.706-721.
- [24] Barenblatt G. I.: The Mathematical Theory of Equilibrium Cracks in Brittle Fracture. Prikladnaja Matematika i Tekhnicheskaja Fizika. 1961/4. p.55-129.
- [25] Leonov M. Ja., Panasyuk V. V.: Razvitok hajdribnishikh trishhin v tverdomu tili. Prikladnaja Mekhanika, 1959. Vol. 5. vyp. 4. p. 391-401.
- [26] Panasyuk V.V.: Mekhanika kvazikhрупкого razrushenija materialov. Kiev, Naukova Dumka. 1991.
- [27] Dugdale D. S.: Yielding of Steel Sheets Containing Slits. Int. Journ. of Mech. and Phys. of Solids. Vol. 8. 1960. p.100-104.
- [28] Wells A. A.: Critical Crack Opening Displacement as Fracture Criterion. Proc. of the Crack Propagation Symp. Cranfield. Vol. I. 1961. p.210-221.
- [29] http://en.wikipedia.org/wiki/Alan_Arthur_Wells
- [30] Rice, J.R. - Rosengren, G.F.: Plain Strain Deformation Near a Crack Tip in a Power-Law Hardening Material. Journ. Mech. Phys. Solids, 1968. Vol.16. p.1-12.
- [31] Hutchinson, J.W.: Singular Behaviour at the End of a Tensile Crack in a Hardening Material. Journ. Mech. Phys. Solids, 1968. Vol.16. p.13-31.
- [32] Kachanov L.M.: Osnovny mekhaniki razrushenija. Nauka, Moskva, 1974.
- [33] Cserepanov, G.P.: Mehanika hrupkogo razrusenije. Nauka, Leningrad, 1974. 640p
- [34] Rice J. R.: A path-independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks. Journal of Applied Mechanics. 1968. p. 379-386.
- [35] Gillemot L.: A fémek tulajdonságainak jellemzése a fajlagos alakváltozás munkájával. MTA VI. Osztály Közleményei, 1966. p. 9-31.
- [36] Gillemot L., Sinay G.: A kontrakciós munka mint anyagjellemző. MTA VI. Osztály Közleményei, 1958. 4. sz. p. 344-366.
- [37] Romvári P., Tóth L.: A fajlagos törésmunka alkalmazása az acélok fáradásos repedés terjedésével szembeni ellenállásának becslésére. Gép, (33), 1981/8. p. 281-285.
- [38] Romvári P., Tóth L.: Primenenie koncepcii udel'noj raboty razrushenija dlja ocenki ciklicheskoj treshhinosztojnosti stalej. Problemy Prochnosti, 1986/1. p. 11-17.
- [39] Romvári P., Tóth L.: A Correlation of Absorbed Specific Energy with the Exponent in Paris Equation of Fatigue Crack Growth. Absorbed Specific Energy and/or Strain Energy Density Criterion Int. Symp., Budapest, 1980. Szeptember 17-19. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1982. p. 358.
- [40] Tóth L., Nagy Gy.: The Connection of the Constants of Paris-Erdogan Law and its Consequences. VIII. Congress on Material Testing, Budapest, 1982/9. 28.-10. 1. OMIKK-TECHNOINFORM, Budapest, 1982. p. 372-378.
- [41] Tóth L., Nagy Gy.: A fajlagos törésmunka alkalmazása fáradási anyagjellemzők becslésére. Tudományos Emlékülés Gillemot L. egyetemi tanár, akadémikus születésének 75. és halálának 10. évfordója tiszteletére. Ráckeve, 1987/11. 20-22.
- [42] Romvári P., Tóth L., Nagy Gy.: Anwendungsmöglichkeiten des Konzepts der spezifischen Brucharbeit zur Abschätzung bruchmechanischer Ermüdungs-kennwerte von Stählen. VIII. Symposium "Verformung und Bruch", Magdeburg, 1988/9. 6-8. Magdeburg, 1988. Teil 1. p. 142-144.
- [43] Romvári P., Tóth L., Nagy Gy.: Application of the ASPEF Concept for Estimation of Material Behaviour under Cyclic Loading Failure Analysis. Theory and Practice EMAS. Proceedings of the ECF 7, 1989/3. p. 649-655.
- [44] Tóth, L.: The Reliability of Cracked Structure Elements and the Reproducibility of NDT Methods. The Ninth International Colloquium on Mechanical Fatigue of Metals, Smolenice, 1987/11. 3.-12. 4., p. 77-82.
- [45] Tóth, L.: Notch Sensitivity-Crack Sensitivity. International Conference on Fracture, ICF 8. Kiev 1993. június 8-13. Part II. p.640.
- [46] L. Tóth: CPSI- The Bridge the Requirements of NDE Results and Reliability of Structural Integrity Assessment. 1st International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components. Amsterdam. 20-22 October, 1998. p.656-661.
- [47] Tóth, L.: Reliability Assessment of Cracked Structural Elements Under Cyclic Loading. Handbook of Fatigue Crack Propagation in Metallic Structures. Edited by A. Carpinteri, ELSEVIER 1994. Vol. II. pp.1643-1683.
- [48] M. Dmytrakh – A.B. Vainman – M.H. Stashchuk – L. Tóth: Fracture Mechanics and Strength of Materials. Volume 7, National Academy of Sciences of Ukraine, Karpenko Physico-Mechanical Institute, 2005. pp. 251-407. (Chapter IV. and V.)
- [49] L. Tóth, N. Szűcs, Sz. Szávai: Crack Propagation Sensitivity Index Handbook. 17th European Conference on Fracture. 2-5 September, 2008. pp.2393-2400.
- [50] N. Szűcs, L. Tóth, Sz. Szávai: Crack Propagation Sensitivity Index Handbook. Journal of Materials Science and Technology. Vol.16., 2008. No.3. pp.192-202.
- [51] L. Tóth, N. Szűcs, Sz. Szávai: Handbook of Crack Propagation Sensitivity Index. Presentation on the „3rd Hungarian-Ukrainian - Bulgarian Joint Conference on SAFETY-RELIABILITY AND RISK OF ENGINEERING PLANTS AND COMPONENTS” and „XIV INTERNATIONAL COLLOQUIUM ON MECHANICAL FATIGUE OF METALS” MAY 22-24, 2008. VARNA.
- [52] L. Tóth: CPSI, as the Harmonised Tool for Reliability Assessment of Elements having Crack-like Defects. IAEA Workshop on selected TLAs, Budapest, February 28 – March 2, 2006. Kiadva CD-n.
- [53] L. Tóth – P. Trampus: Structural Integrity Assessment of Engineering Structures – Basic Approach. “5th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components”, Paradise Point Resort & Spa, San Diego, CA, USA, 10-12th May, 2006.
- [54] <http://www.standardcatalog.com/catalog/show/ASTM-E399/history/>
- [55] <http://www.matweb.com/>
- [56] Czoboly E.: A törésmechanika fejlődése és jelenlegi főbb irányai. Műszaki Tudomány. 1977. 43. évf. p.391-412

Törési vizsgálatok a BME Mechanikai Technológia Tanszéken

Czoboly Ernő^{1,a}, Havas István^{1,b}, Orbulov Imre Norbert^{1,c}

Kulcsszavak: törés, törésmechanika, törési munka

Absztrakt: Rövid cikkünkben összefoglaljuk a Budapesti Műszaki Egyetem Mechanikai Technológia Tanszékén, a későbbiekben a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Anyagtudomány és Technológia Tanszékén végzett kutatásaink eredményeit. Cikkünk a hagyományos, tudományos cikkektől eltérően kronológiai sorrendben mutatja be a Tanszéken végzett kutatások módszertanát és eredményeit. Az első bekezdések a törésmechanika kialakulásához vezető mérnöki igények, káresetek ismertetésével kezdődik, majd a klasszikus elemek mentén haladva összefoglalásunkat a törési munka alapján meghatározott törési szívósságok elemzésével zárjuk.

Egy szerkezetnek, vagy gépnek váratlan törése minden mérnök rémálmai körébe tartozik, mert egy ilyen esemény nemcsak komoly anyagi veszteséget, de sok esetben emberek halálát is okozhatja. A teljes törést általában egy szerkezeti elem, vagy alkatrész meghibásodása váltja ki. Bár törések sajnos, korunkban is előfordulnak, jelenlegi ismereteinkkel mégis sokkal megbízhatóbban lehet gyártmányainkat tervezni, gyártani és üzemeltetni, mint kereken fél évszázaddal ezelőtt.

Az anyagok töréssel szembeni ellenállásával, e tulajdonság számításokra is alkalmas anyagjellemző mérőszámának megalkotásával körülbelül ez idő tájt kezdtek világszerte foglalkozni. Az hamarosan tisztázódott, hogy amint azt már korábbi vizsgálatok alapján is megállapították [1, 2], a törés bekövetkezését egyedül csak feszültség dimenziójú mérőszámmal nem lehet jellemezni.

A világban ez idő óta elterjedt és általánosan elfogadott kutatási irányzat, a *törésmechanika* abból indult ki, hogy az egyébként szívósnak vélt szerkezeti acélok meghatározott, szerencsétlen üzemi körülmények között nagymértékben elridegnek és ilyenkor a szerkezetben lévő kisebb – nagyobb hibák (repedések) jelentős alakváltozás nélküli törést okozhatnak. Ezért kutatásaiknál azt a szélsőséges esetet vették alapul, hogy az anyag teljesen rideg, így a repedések környezetét a rugalmasságtan alapképleteivel lehet jellemezni [3]. Ez a megközelítés néhány valós esetenél igen jó, főleg nagyszilárdságú acélokból készített, nagyméretű szerkezeteknél, amelyeknél a törésmechanikai számításokra vonatkozó követelmények kielégülnek. Ezeknek a számításoknak az alapja a *feszültségintenzitási tényező* ($K=f(\sigma, c, X)$), amely a geometrián (X) kívül csak az átlagos feszültségtől (σ) és a repedés méretétől (c) függ. Ezt a számított értéket kell összevetni az anyagvizsgálatok által szolgáltatott kritikus értékkel, amely már *anyagjellemző*. (K_{IC}) Ezt *törési szívósságnak* nevezik és dimenziója $\text{MPa}^{1/2}$.

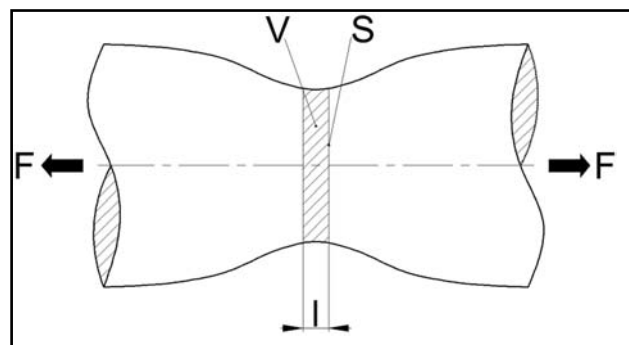
A gyakorlati esetek többségében azonban a szerkezeti anyagok nem viselkednek teljesen ridegen, a repedés terjedését több – kevesebb képlékeny alakváltozás kíséri, ami a viszonyokat alapvetően változtatja meg. Ezért a törésmechanika érvényességi tartományát a képlékeny anyagok irányába igyekeztek kiterjeszteni és új anyagjellemzőket vezettek be. E téren úttörő volt Wells [4]. A *képlékeny törésmechanika* fogalmát ő hozta köztudatba. Az általa javasolt anyagjellemző a *repedés kinyílás* volt, angol nevéből rövidítve: *COD* (*Crack Opening Displacement*). Kissé zavaró, hogy az egyes anyagok töréssel szembeni ellenállását hosszegységgel mérjük, a *COD* mérőszám dimenziója ugyanis *mm*. Igaz, a *COD* kapcsolata a K_{IC} -vel a G_{IC} -vel jelölt, felületre számított, fajlagos, elnyelt munkán keresztül valósul meg [J/mm^2].

Ugyanígy, a törési felületre vonatkoztatott, fajlagos energia a jelenleg leginkább elfogadott képlékeny törésmechanikai mérőszám, a *J-integrál* fizikai jelentése is. Bár a *J-integrál* a gyakorlatban jól beválik és egyszerű

kapcsolata a K_{IC} -vel a törésmechanika alkalmazását nagyban kiterjesztette, két okból is kritizálható. A *J* integrál Rice [5] által közölt levezetése úgyszintén a *rugalmasságtan* fogalmait használja, a képlékenységtan fogalmaival nem foglalkozik. Továbbá a dimenziója szerint *felületi* energiaként veszi számításba a próbatest által a törés során elnyelt munkát. Ez pedig csak durva közelítésként állja meg a helyét, mivel az energia egy vékony *felületi rétegben* nyelődik el.

A törésmechanika kidolgozásával hozzávetőlegesen egy időben Gillemot László professzor figyelme is a törés jelensége felé fordult [6]. Ő azonban a *képlékeny* és *szívós* anyagok törését vizsgálta, kutatva továbbá a terhelés körülményei által okozott ridegítő hatások mértékét is. Gillemot elmélete szerint a szívós anyag egy rá jellemző munka-, vagy energia-mennyiség elnyelődésének hatására törik el. Ez a munka 3 részre tagozódik: a rugalmas munka, a képlékeny alakváltozás munkája és az új felület képződésének munkája. A rugalmas munka a szakadás után felszabadul, a felületi energia pedig elhanyagolhatóan kicsi a képlékeny alakváltozás munkájához képest. Ez utóbbit fajlagosan, a munkát elnyelő *térfogatra* vonatkoztatva fizikailag helyes mérőszámmal kapunk

Az így definiált *törési munka*, W_c (J/cm^3) egyszerű szakítókéssérréttel meghatározható (1. ábra).



1. ábra. Kontrahált szakítópróbatest részlete

Az 1. ábra szerint tehát

$$W_c = \int_{l_0}^{l_u} \frac{F}{V} dl = \int_{l_0}^{l_u} \frac{F}{AV} dl = \int_0^{\varphi_u} \sigma d\varphi \quad (1)$$

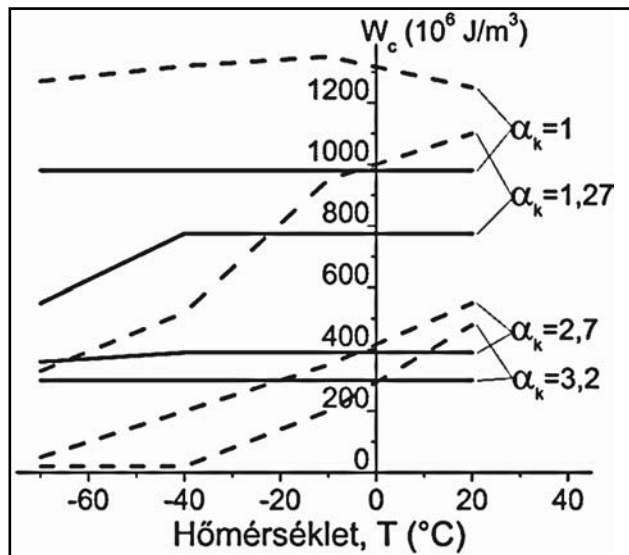
ahol σ a valódi feszültséget, φ a valódi nyúlást jelenti [7]. A kutatómunka kezdetén a σ - φ görbék alatti területet planimetráltuk, mert a valódi feszültség görbe analitikai meghatározása meglehetősen bonyolult volt [8]. Később, tapasztalataink alapján közelítő képletekkel határoztuk meg a törési munkát. Ilyen közelítő megoldásokat több hazai és külföldi kutató is ajánlott [8-10].

A törési munka sajátosságaival, különböző körülmények közötti változásával, a befolyásoló tényezők hatásával sokan foglalkoztak. Elsősorban a közismert állapototényezőknek, a hőmérsékletnek (7), a terhelés sebességének ($d\sigma/dt$) illetve a feszültségi állapot többletengelyűségének ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) hatását vizsgálták. Egy mérőssorozat jellegzetes eredményeit mutatja a 2. ábra [11].

A feszültségek háromtengelyűségét a szakítópróbatestek egyre élesedő bemetszésével értük el, és a Neuber-féle alaktényezővel, α_K val számszerűsítettük. Látható, hogy a dinamikus igénybevétel a nagyobb hőmérsékleteknél az anyag viselkedése szempontjából kedvezőbb, de ez a tartomány a bemetszések hatására rohamosan toódik a nagyobb hőmérsékletek felé, azaz a kis hőmérséklet, a bemetszések és a dinamikus igénybevétel együttesen az anyagot gyorsan elridegitik.

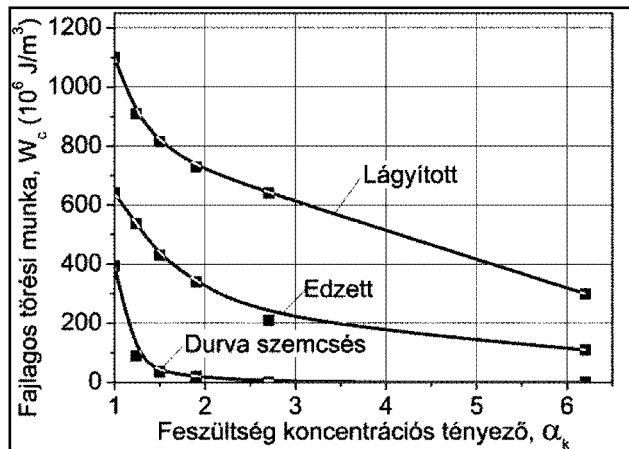
¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Anyagtudomány és Technológia Tanszék, 1111, Budapest, Bertalan Lajos utca 7.

^a ernoczoboly@gmail.com, ^b havaspp@t-online.hu, ^c orbulov@eik.bme.hu



2. ábra. A fajlagos törési munka változása a hőmérséklet függvényében statikus (folytonos vonal) és dinamikus (szaggatott vonal) vizsgálat esetén, különféle α_k értékek mellett

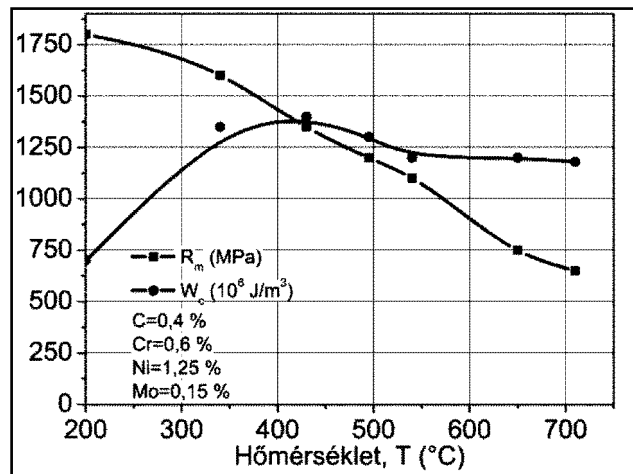
A feszültségek háromtengelyűségének eltérő hatását szemlélteti a 3. ábra egy kiválasztott varratfém különbözőképpen hőkezelt állapotában. Mivel a különböző hegesztési hibák igen jól jellemezhetők az α_k -val, adódik a lehetőség, hogy a varrat egyes részeiben létrejött hibák hatását a törési hajlamra ilyen módon egyértelműen meg lehet határozni és a veszélyes eseteket ki lehet választani [12, 13].



3. ábra. Varratfém fajlagos törési munkájának változása a hőkezeltégi állapot függvényében

A törési munka, mint anyagparaméter más anyagválasztási, vagy technológiai feladatok optimalizálásánál is felhasználható. Valamennyi vizsgálat ismertetése helyett itt csak néhány jellegzetes, eltérő kutatást említünk meg: Ivanova és társai a törési munka alapján jellemezték különböző kazán anyagok kúszás állóságát [14], míg Romvári és Tóth a fáradásos repedésterjedés sebességét hozták a törési munkával összefüggésbe [15]. Czoboly és szerzőtársai az előzetes hidegalakítás hatását vizsgálta a törési munka alapján [16]. Artinger a szerszám-anyagok optimális megeresztési hőmérsékletét ajánlotta az alábbiak alapján megválasztani [17]. Mérései szerint a törési munka a megeresztési hőmérséklet függvényében eleinte gyorsan nő, majd egy maximum elérése után közel állandó marad. A folyáshatár viszont folytonosan csökken. Egy CrNiMo acélra vonatkozó mérés eredményeit mutatja be a 4. ábra.

Az ajánlott megeresztési hőmérséklet tartomány 425°C környékében van. Ebben az esetben a szívósság a maximum környékén mozog, míg a folyáshatár értéke még elegendően nagy. Végül Gillemot Ferenc [18] a neutron sugárzás hatását mérte ki a törési munka

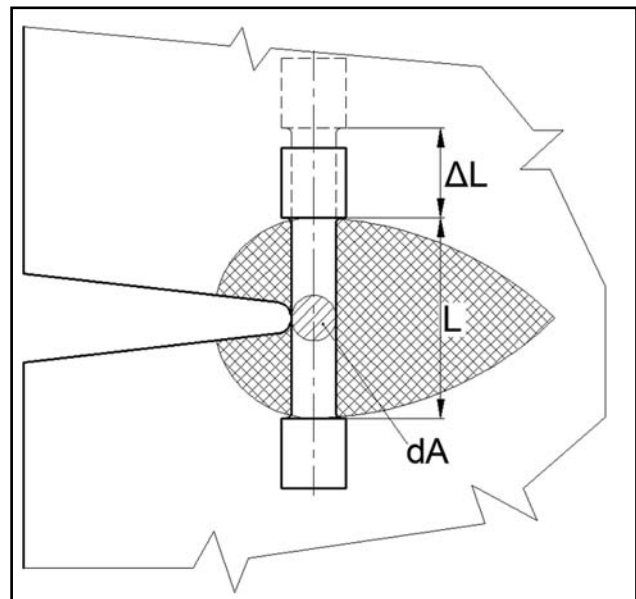


4. ábra. CrNiMo ötvöztetű acél szakítószilárdságának és fajlagos törési munkájának változása a megeresztés hőmérsékletének függvényében

változása segítségével. E vizsgálatoknak különös jelentőséget ad, hogy a mérésekhez nincs szükség nagyméretű próbatestekre, amelyek csak nehezen sugározhatók be, a vizsgálatnál veszélyesek és a radioaktív hulladékot feleslegesen növelik.

A törési munka felhasználásának újabb területét nyitotta meg az a felismerés, hogy a törésekkel foglalkozó két alapvető elmélet: a *törésmechanika* és a *törési munka* a valós anyagok esetében, amelyek nem teljesen ridegek, de nem is túlzottan képlékenyek, összekapcsolhatók. Az ezzel kapcsolatos kutatómunka lényegében két részletben, két helyszínen folyt és a Tanszék két munkatársa által elnyert állami ösztöndíjnak volt köszönhető. Czoboly Ernő 1969-ben 6 hónapot dolgozott Londonban, az Imperial Collegeban, míg Havas István 1973-ban töltött egy félévet a düsseldorfi Max Planck Intézetben.

Az általuk kidolgozott koncepció az 5. ábrán látható közismert modellen alapul. Az ábra egy feszültség koncentrációs helyet, röviden „bemetszést” mutat, amely kellően kis bemetszési sugár esetében egy repedés is lehet.



5. ábra. Feszültségkoncentrációs hely a hozzá tartozó képlékeny zónával és fiktív szakítópróbatesttel

A darabot húzó feszültséggel terhelve a bemetszés tövében egy képlékeny zóna jön létre, amelyben jelentős energia nyelődik el. A darabot a repedés megindulásáig terhelve, ennek az energiának az értéke E . A képlékeny zónán át gondolatban egy kis próbatestet fektetünk keresztül, amelynek L hossza, a zóna vastagságával,

keresztmetszete tetszőlegesen választott dA -val egyenlő. Az L méret az anyagi tulajdonságoktól és a bemetszés élességétől függ. Egy repedés esetében L értéke minimális lesz, L_0 és egyben az elnyelt energia is a legkisebb, E_0 .

Ez az E_0 a kétféle törési elmélet szerint kétféle módon határozható meg, de mivel valójában ugyanarról az energiáról van szó, a két eredménynek egymással meg kell egyeznie [19].

A törésmechanika szerint a képlékeny zónában a törésig elnyelt energia az újonnan keletkezett repedés felületével, azaz a képzeletbeli kis próbatest keresztmetszetével arányos, azaz

$$E_0 = dAG_{Ic} \text{ vagy } E_0 = dAJ_{Ic} \quad (2)$$

attól függően, hogy Wells vagy Rice által megadott törési paramétert kívánjuk használni. A törési munka elmélete szerint az energia a képzeletbeli próbatest térfogatában nyelődik el, azaz

$$E_0 = dAL_0W_c \quad (3)$$

Összevetve a fenti egyenleteket, egyszerűsítés után kapjuk, hogy

$$G_{Ic} = J_{Ic} = L_0W_c \quad (4)$$

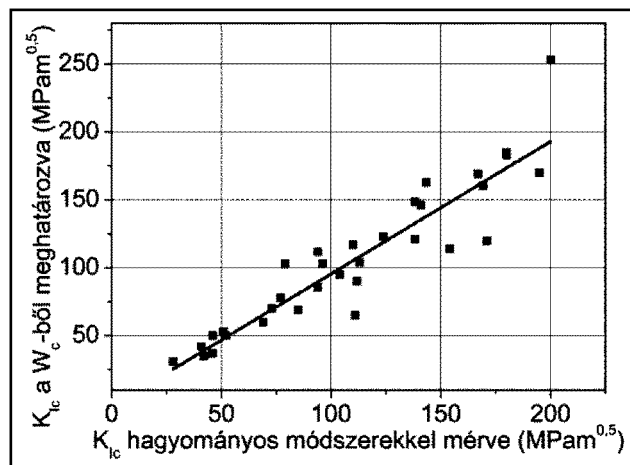
Hasonló gondolatmenetet lehet követni az alakváltozással kapcsolatban is. Ilyenkor a törésig bekövetkező megnyúlást kell számításba venni (5. ábra). A ΔL értéke is az anyagi tulajdonságokat leszámítva nyilvánvalóan az L függvénye. Így a repedés esetén a ΔL -nek is minimuma van. Ez a ΔL_0 egyenlő kell, hogy legyen a Wells által bevezetett COD-vel, feltételezve, hogy a fiktív próbatest törési nyúlása a törési munkához analóg módon megegyezik a szakítópróbatest kontrakciós helyén mért nyúlással [20]. Ebből a további törésmechanikai paraméterek a szokásos módon származtathatók.

Természetesen az L_0 értékének meghatározása közvetlenül (repedésnél) nem lenne egyszerű feladat, ezért közvetett módszereket dolgoztunk ki. Egy sorozat különböző bemetszési sugárral készített próbatestet használva extrapolációval kaptuk meg a keresett értéket [21, 22]. Ez a módszer főleg ott előnyös, ahol a vizsgálandó termékből a törésmechanikai mérésekhez szükséges méretű próbatestek nem munkálthatók ki [23].

A módszer használhatóságát többféle anyaggal ellenőriztük, amennyiben az extrapolációs méréseket hagyományos vizsgálatok eredményeivel vetettük össze. Ezeknek a hagyományos vizsgálatoknak egy részét nem is a Tanszéken, hanem más kutatóhelyeken végezték el. Az összehasonlító eredményeket a 6. ábra foglalja össze [24].

Látható, hogy az egyezés teljesen kielégítő, főleg ha figyelembe vesszük a törésmechanikai vizsgálatok eredményeinek nagy szórását is, amit főleg nem a vizsgálatok bizonytalansága, hanem az anyag okozta sajátosságok okoznak.

Az itt bemutatott vizsgálatok és módszerek a tanszéken végrehajtott, töréssel kapcsolatos kutatásoknak csak egy kiragadott szegmense volt. Igyekeztünk azonban, hogy a sokoldalúságot, a különféle felhasználási területeket is valamelyest érzékeltessük.



6. ábra. Összevetés a hagyományos módszerekkel mért és a fajlagos törési munkából meghatározott törési szívósságok között

Hivatkozások

- [1] Griffith AA: The Phenomenon of Fracture and Flow. Solid. Phil. Trans. Roy. Soc. London. A-221. (1920) 163-179
- [2] Orowan E: Energy Criteria of Fracture. Welding Journal Research Supplement 20 (1955) 157-160
- [3] Irwin GR: Fracture Mechanics. Contribution to the First Symposium on Naval Structural Mechanics. Stanford University, Stanford, California, USA 1958
- [4] Wells AA: The Application of Fracture Mechanics at and beyond General Yielding. British Welding Journal (1963) 536-
- [5] Rice JC: A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks. Journal of Applied Mechanics 35 (1968) 379-386
- [6] Gillemot László, Sinay Gábor: Die Brucharbeit als Werkstoffkenngröße. Acta Technica Ac. Sci. Hung. Tom. XXII (1958) 149-173
- [7] Gillemot László: Zur Rechnerischen Ermittlung der Brucharbeit Materialprüfung 3 (1961) 330-336
- [8] Ziaja György: Periodica Polytechnica, Engineering. (1959) vol.3. pp.147-156.
- [9] Saposnyikov NA: Fémek mechanikai vizsgálata. Nehézipari Könyvkiadó, Budapest, 1952
- [10] Nadasan S, Safta V: Beiträge zur Bestimmung der spezifischen, mechanischen Brucharbeit beim statischen Zugversuch. Mitteilung der V. Konferenz für Schweistechnik und Materialprüfung, Timisoara, 1965
- [11] Gillemot László: Anyagszerkezettan és Anyagvizsgálat. Tankönyvkiadó, Budapest, 1979
- [12] Gillemot László: Brittle fracture of welded materials. Commonwealth Welding Conference, Sessions VIII-XI, paper #7, London, 1965, 1-6.
- [13] Konkoly Tibor: Auswärtung von radiographisch ermittelten Schweißfehlern in Stählen unter rechnerischer Berücksichtigung der Spödbbruchneigung von Schweißgut. Materialprüfung 12 (1970) 348-350
- [14] Ivanova VS, Ragozin YI, Vorovjev NA: Academy Nauk UdSSSR, 168 (1966) 51-54.
- [15] Romvári Pál, Tóth László: A correlation of Absorbed Specific Energy with the exponent in Paris- Equation of Fatigue Crack Growth. Proc. Int. Symp. On Absorbed Specific Energy and/or Strain Energy Density Criterion, Budapest, 1982, 355- 358
- [16] Czoboly Ernő, Havas István, Safta V, Moisa T: Az előzetes hidegalakítás hatása egy kazánacél törési tulajdonságaira. Bányászati és Kohászati lapok. Kohászat 114 (1981) 369-373.
- [17] Artinger István: A Cr-Mo-V erőműi acélok hőkezeltségi állapotának vizsgálata a fajlagos törési munka alapján. Bányászati és Kohászati Lapok. Kohászat. 101 (1968) 120-124.
- [18] Gillemot Ferenc: Absorbed Specific Energy of Fracture, a Failure Criteria for Neutron Irradiated Materials. Proc. 5th Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology. West Berlin, 1979 paper G3
- [19] Radon JC, Czoboly Ernő: Material Toughness versus Specific Fracture Work. Proc. Int. Conf. on Mechanical Behaviour of Materials. Kyoto, Japan, 1972 vol.1. pp. 543-557
- [20] Havas István, Schulze HD, Hagedorn KE, Kochendörfer A: Der Zusammenhang zwischen der spezifischen Brucharbeit und der Bruchzähigkeit. Materialprüfung 16 (1974) 349-353
- [21] Gillemot László, Czoboly Ernő: Generalized Theory of Fracture. II. Conference on Brittle Fracture, Marianske Lázně, 1970 No.11. pp.1-21
- [22] Czoboly Ernő, Havas István, Gillemot Ferenc: The Absorbed Specific Energy till Fracture as a Measure of the Toughness of Metals. Proc. of Symposium on Absorbed Specific Energy/Strain Energy Density. Sijthoff and Nordhoff – Akadémiai Kiadó Budapest, 1982, pp. 107-129
- [23] Elarbi Y, Palotás Béla: Determination of the Creep Properties of Creep Resistant Martensitic Steels at Elevated Temperature from their Crack Opening Displacements (COD). IIW 60 th Annual Assembly and International Conference, Proceeding of the IIW International Conference Welding and Materials, Technical, Economic and Ecological Aspects, Dubrovnik and Cavtat, Croatia 2007 pp. 235-242
- [24] Czoboly Ernő, Havas István: Töréssel kapcsolatos kutató- és oktatómunka a BME Mechanikai Technológia tanszéken. GTE Szeminárium, 1994, Budapest

A roncsolásmentes vizsgálat fejlődésének száz éve Magyarországon

Trampus Péter¹

Bevezetés

Az ember évezredek óta használja a szemét anyagok vizsgálatára, és a napjainkban alkalmazott roncsolásmentes vizsgálati eljárások többségének a fizikai elve is már jó néhány száz éve ismert, a „roncsolásmentes vizsgálat” fogalom mégis csak a huszadik század elején született. Irodalmi források szerint az amerikai *Elmar Ambrose Sperry* alkalmazta elsőként a „*nondestructive*” kifejezést, amikor 1928-ban vasúti alkatrészeket mágnesezhető poros vizsgálatot végzett és eredményeit közölte [1]. A német nyelvű szakirodalomban 1933-ban lehetett először felfedezni a „*zerstörungsfrei*” jelzőt [2]. Kutattunk a magyar nyelvű szakirodalomban a „roncsolásmentes” szó első megjelenésére vonatkozóan. *Mende Jenő* a Természettudományi Közlöny apró közleményei között 1920-ban megjelentetett rövid írásában a fémek Röntgen-sugarakkal történő vizsgálatával kapcsolatban azt írta, hogy „...az eljárás azért fontos, mert az anyagot megrongálása nélkül lehet vizsgálni.” [3]. Ami bizonyos, hogy *Gillemot László*, a magyar királyi József Nádor Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépész és Vegyész-mérnöki Karának Gépész-mérnöki Osztályához a műszaki doktori cím elnyeréséért 1940-ben benyújtott disszertációja már magától értetődő módon használja a roncsolásmentes vizsgálat fogalmát, amikor Gillemot a következőket írja a disszertációja bevezetésében: „A legelterjedtebb és legnagyobb jelentőségű roncsolásmentes anyagvizsgálati módszer ma a röntgenvizsgálat...” [4].

Jelen cikk írására elsősorban az adott okot, hogy Gillemot László születésének századik évfordulója tiszteletére a BME Anyagtudományi és Technológia Tanszéke a magyar műszaki anyagtudomány és anyagvizsgálat évének nyilvánította az 2012. évet [5]. A centenáriumi év rendezvényeinek megszervezésében közreműködött az MTA Műszaki Tudományok Osztálya Anyagtudományi és Technológiai Tudományos Bizottsága és a Magyar Roncsolásmentes Vizsgálati Szövetség. A centenáriumi rendezvények egyik kiemelkedő programja volt a Magyar Tudományos Akadémia Dísztermében tartott tudományos emlékkonferencia. Írásom az emlékkonferencián elhangzott előadás kibővített változata.

Egy ilyen, a fejlődést bemutató összefoglaló cikk megírása során akaratlanul is felmerül a korszerűség kérdése (pl. korszerű eljárás). A korszerűség sokféleképpen értelmezhető és bemutatható. Az egyik leglátványosabb módszer lehet a száz vagy akár csak ötven évvel ezelőtt használatos, akkor korszerűnek mondott vizsgáló készülékek összehasonlítása a jelenlegiekkel. Hála a számítástechnika, a mikroelektronika és más tudományterületek eredményeinek, a mai készülékek már nem is hasonlítanak a régiekre, a generációk közötti különbség óriási. Jelentheti-e ez azt, hogy a százéves készülék nem korszerű? Azt is lehet például elemezni, hogy évtizedekig csak néhány (legfeljebb tíz) járatos roncsolásmentes vizsgálati módszerről beszélünk. Ezzel szemben ma bármelyik nagy nemzetközi konferencián, amely a roncsolásmentes vizsgálatról foglalkozik, már száz felett van az ismertett eljárások száma. A korábbi tíz módszer már nem korszerű? Egyet nem szabad elfelejteni, sem a készüléktechnika fejlődése, sem az eljárások specializálódása, sem egyéb szempont alkalmazása vonatkozásában. Nem attól válik valami korszerűvé, ha kicsi és digitalizált vagy egy igen bonyolult, speciális feladat megoldására fejlesztették ki. Minden roncsolásmentes vizsgálati eljárás korszerű, ha ismerjük az eljárás lehetőségeit és korlátait, és ezeket szem előtt tartva alkalmazzuk őket. Elődeink között megtaláljuk azokat a kiváló tudósokat, mérnököket

és a vizsgálatokat végző értékes szakembereket, akik ha nem is hangoztatták az előző gondolatot, de annak szellemében végezték munkájukat. Ez az írás nekik is tisztelegni kíván.

A hazai roncsolásmentes vizsgálat krónikája

Az elmúlt évtizedekben több kitűnő visszatekintő cikk is született, amelyek feldolgozták a hazai anyagvizsgálat és ezen belül a roncsolásmentes vizsgálat vagy csak kimondottan a roncsolásmentes vizsgálat történetét, pl. [6–10]. Ezek mellett egy-egy vizsgálati eljárás fejlődésének a történetét is megírták, pl. [11–14]. Jelentős nagyvállalatok készítettek visszaemlékezéseket a cég történetéről, amelyekben általában önálló rész foglalkozott az anyagvizsgálattal, pl. [15–17]. Cikkem megírásakor természetesen támaszkodtam ezekre a korábbi munkákra is, és elkerülhetetlen volt, hogy ne legyen néhány helyen ismétlés vagy átfedés azokkal. Ezeket a hivatkozások is jelzik. De nem használtam fel az áttekintő cikkek valamennyi információját (ezek mindenki számára hozzáférhetők). Kísérletet tettem valamiféle, azoktól különböző koncepció megvalósítására: időszakokra osztottam fel az elmúlt több mint 100 évet. A felosztás önkényes volt, ily módon nem biztos, hogy mindenkinek az ízlésével találkozik, amiért előre is elnézést kérek.

Kezdeményező szerepben a fizikusok

Az első időszak a röntgensugárzás felfedezésével vette kezdetét és az 1930-as évekig tart. Ez az időszak gyakorlatilag csak a röntgenvizsgálatról szól. Báró *Eötvös Lóránd*, a Magyar Tudományos Akadémia elnöke, 1. ábra, *Klupháthy Jenő* és *Pekár Dezső* napokkal *Wilhelm Conrad Röntgen* 1895. november 8-án este tett felfedezését követően, de még annak 1896. január 23-i nyilvánosságra hozatala előtt – hírlapi értesülések alapján – reprodukálta az „X-sugárzást” a Budapesti Tudományegyetem Fizikai Intézetében és röntgenfelvételeket készítettek, egyebek között *Eötvös Lóránd* kezéről [14, 18]. Igen rövid idő alatt további hazai kutatóhelyek is képesek lettek röntgenfelvételek készítésére. Egyebek között *Gothard Jenő* szombathelyi fizikus, *Homor István* szegedi tanár, sőt a győri, szegedi, pécsi és nagyváradai gimnázium diákjai is készítettek felvételeket. Nagyváradon *Károly József Irén*, Késmárkon *Alexander Béla* megszervezte az első orvosi röntgen laboratóriumot. *Kiss Károly* egyetemi tanár a Műegyetemen állított fel egy röntgen készüléket és hozott létre laboratóriumot. A Magyar Tudományos Akadémia III. Matematikai és Természettudományi Osztálya is foglalkozni kezdett a röntgensugarakkal. És mindez még mindig csak 1896-ban történt, kevesebb, mint egy évvel Röntgen felfedezését követően.



1. ábra. Báró Eötvös Lóránd

Ebben az időszakban szükségszerű és ezért teljesen logikus volt a fizikusok kezdeményező szerepe a röntgen laboratóriumok létrehozásában és működtetésében. A kereskedelemben ugyanis még nem lehetett kapni komplett, működőképes berendezéseket. A készülékeket külön-külön megvásárolt részekből kellett összeállítani, és a ke-

¹ Egyetemi tanár, Dunaújvárosi Főiskola

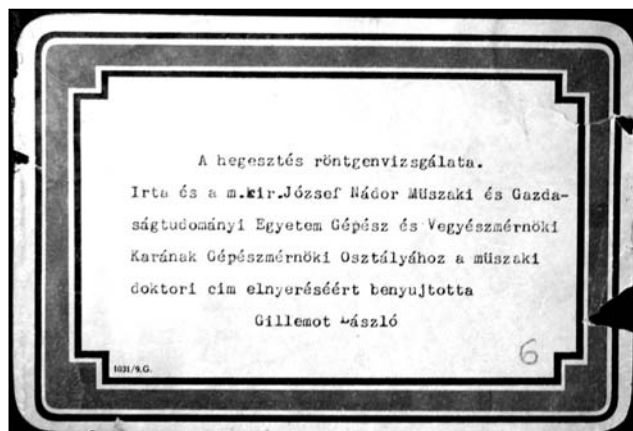
zelésük is nagyon bonyolult volt. Az is érthető, hogy ebben az időszakban a röntgenvizsgálat orvosi alkalmazása került előtérbe. Az első vizsgálatok a sebészet területén történtek: csontsérülések gyógyításánál, idegen test (pl. lövedék) eltávolításánál értek el kiemelkedő eredményeket. Az első orvosi vonatkozású magyar közleményt *Högyes Endre* írta 1896 januárjában [19]. Ebben a szerző saját kísérleteire hivatkozva megállapította, hogy a különböző szövetek és szervek sugárátbocsátó képessége eltérő, és ezzel következtetni engedett a belgyógyászati vizsgálatok lehetőségére. Továbbá a szakirodalomban elsőként mutatott rá arra, hogy a röntgensugárzásnak gyógyászati tekintetben is szerepük lesz.

A mérnökök röntgenvizsgálat iránti érdeklődését az mutatja, hogy sorra számoltak be a külföldön (elsősorban Németországban) elért eredményekről. Ezek a beszámolók általában a Természettudományi Közöny „Apró közlemények” rovatában jelentek meg, pl. [20-22]. Beszámoltak a Röntgen-sugárzás diffrakció és interferencia jelenségeivel kapcsolatban arról is, hogy a „Röntgen-sugaraknak e téren (mármint az anyagok 'végső' szerkezetének a terén) való alkalmazása oly mikroszkópot állított a tudományos kutatás szolgálatába, melynek nagyítási képességéről azelőtt álmodni sem lehetett...” [23], valamint beszámoltak nem fémes anyagok (pl. fa, szén, kocsz, brikett) tulajdonságainak a vizsgálatáról [24].

A műszaki áttörés időszaka

Ez az időszak az 1930-as évektől az 1960-as évekig tart. Jellemző rá, hogy a már bevált orvosi alkalmazások mellett megkezdődött, majd egyre szélesebb teret nyert eleinte a röntgenvizsgálat, majd később feltűntek az egyéb roncsolásmentes vizsgálati eljárások is. A 30-as években jelentek meg az első részletesebb cikkek a röntgensugárzás műszaki alkalmazásáról, de eleinte még továbbra is csak külföldi alkalmazásokra hivatkozva, pl. [25-27]. Az alkalmazási példák felölelték az öntvények, a vasúti sínek, a repülőgép alkatrészek és a hegesztési varratok vizsgálatát. A finomszerkezet vizsgálat terén ismertetésre került a *Bragg*, illetve a *Debye-Scherrer* röntgen spektrográf, amelyek alkalmazhatók például a kristályszerkezet, illetve belső „feszülések” vizsgálatára [26].

Az igazi áttörést Gillemot László kutató munkája jelentette a József Nádor Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen. Saját kísérleti eredményeire alapozva írta meg műszaki doktori disszertációját [4] (2. ábra, a doktori diploma átadása a 3. ábra), amely munkához mérhető összetett, a hegesztési varratok röntgenvizsgálatának szinte valamennyi részterületét felölelő, tudományos és egyúttal a mérnöki gyakorlatban is alkalmazható mű 1939-40-ben nem létezett. Kutatásai során Gillemot számos elméleti kérdést is tisztázott. Ilyen volt például a film feketedésének a röntgensugárzás elnyelődésével és a szóró sugárzás hatásával való kapcsolata; a legkisebb, még kimutatható anyaghiba észlelhetősége a csőfeszültség függvényében; a síkfelületű tárgyakon elért eredmények általánosítása, illetve az eredmények kiterjesztése



2. ábra. Gillemot László disszertációjának fedőlapjáról.



3. ábra. Gillemot László 1941. június 13-án átveszi doktori diplomáját.

hengeres felületekre. Az elméleti kérdések mellett számos, a gyakorlati életben fontos felismerést is közzé tett. Kísérleti úton meghatározta az elméleti összefüggésekben szereplő állandókat, hogy azokat a gyakorlati munka során hasznosítani lehessen, és bármely anyagra általánosíthatóak legyenek. A röntgenfelvételek kiértékelésével kapcsolatban megállapította, hogy a helyes eljárással készített felvétel csak megbízható módon értékelhető, és ennek alapján megbecsülhető a hegesztési varratban található folytonossági hiányoknak a szakítószilárdságra gyakorolt hatása. Összefüggést talált továbbá az egyes hibák mérete és a varratfém szakítószilárdsága, valamint a hegesztőpálca minősége és a varrat hőkezeltiségi állapota között. Megállapította a fotometrikus kiértékelés szóródásának kísérleti eredményeiből, hogy a folytonossági hiányok felismerhetősége a röntgenvizsgálatok természete miatt korlátozott.

A roncsolásmentes vizsgálat hazai elterjedésének felgyorsulása a második világháborús készülődésnek köszönhető. A Weiss Manfréd Művek Rt. repülőgépgyárában francia licenc alapján repülőgép motorokat gyártottak, és a motor könnyűfém öntvényeinek a vizsgálatára röntgen laboratóriumot létesítettek 1937-38-ban [15]. Ez volt az ország első ipari röntgen laboratóriuma. Ugyanitt alkalmaztak egy nagyméretű mágneses repedésvizsgáló készüléket is. Meg kell jegyezni, hogy a repülőgépgyártás szigorú követelményei segítettek az anyagvizsgálat más területei fejlődésének is. Lényegében ezekben az években, illetve a második világháború alatt alakult ki Csepelen a teljes anyagvizsgálati vertikum, amely magába foglalta a roncsolásmentes laboratóriumon túlmenően a mechanikai, a metallográfiai, a szinképelemző, a kémiai és a finomszerkezeti röntgen laboratóriumot is. Az alapítás *Réti Pál* nevéhez fűződik. A hadigazdálkodás támasztotta igényeket természetesen nemcsak a Weiss Manfréd Művek Rt., hanem más cégek, mint például a MÁVAG, a Ganz Vagon- és Gépgyár, a Győri Vagon- és Gépgyár és a Diósgyőri Gépgyár elégítette ki, ami ezeknél a cégeknél is jelentősen hozzájárult az anyagvizsgálat és természetesen a roncsolásmentes vizsgálat fejlődéséhez.

A következő lökést a világháborúban lerombolt ország újjáépítése adta. Helyre kellett állítani a közlekedést, az energia ellátást, a gépgyártást, hogy csak a legfontosabbakat említsük. Budát és Pestet az ideiglenes Kossuth híddal kötötték össze, 4. ábra, amelynek hegesztési munkáiért és a hegesztési varratok röntgenvizsgálatáért Gillemot Lászlót Kossuth díjjal tüntették ki. A Budapesti Műszaki Egyetem (pontosabban a „Gillemot Tanszék”) munkatársai igencsak kivették részüket az újjáépítési munkákban. Rendszeresen járták az országot, és a gyárakban, illetve az erőművekben röntgenézték a vasúti tartálykocsik, a kazánok, az új hidak alkatrészei hegesztési varratait [28]. A tanszék munkatársai által alkalmazott röntgen berendezés még az a világháború előtti



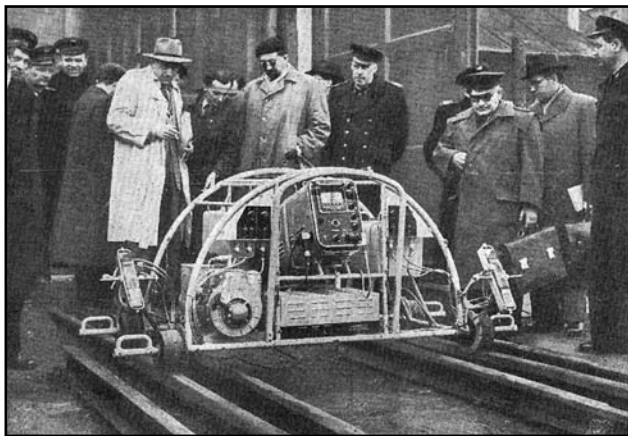
4. ábra. A Kossuth híd.

készülék volt, amellyel Gillemot László a disszertációjának a röntgenfelvételeit készítette.

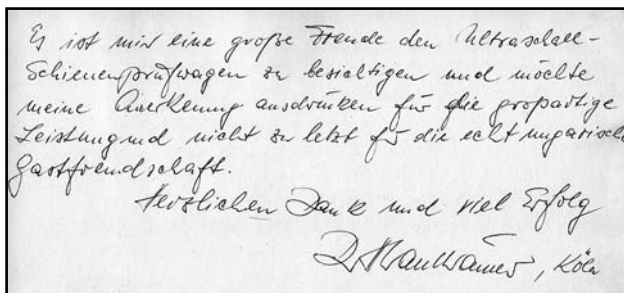
Az 1950-es években kezdett elterjedni hazánkban is a radioaktív izotópok alkalmazása anyagvizsgálati célokra [12]. Az első hazai izotóp laboratóriumot a Csepel Művekben létesítették, vezetője Varga Károly volt. Itt a radiográfiai vizsgálatok mellett nyomjelzés-technikai és izotópkémiai vizsgálatokat is végeztek, valamint mérés-technikai eszközök egyedi tervezése és gyártása is folyt. Hazai fejlesztésű és gyártású, automatizált gamma-defektoszkópokat alkalmaztak a földgáz- és köolajvezeték építésekhez [9].

Ugyancsak ebben az időszakban jelent meg hazánkban az ultrahangos vizsgálat. Elterjedése nem volt problémamentes, amint azt Réti Pál cikkeiben olvashatjuk [7, 11]. Az okok között találjuk, hogy kevés volt a korszerű (azaz mind érzékenység, mint teljesítmény szempontjából alkalmazható és gyors, megbízható és jól kiértékelhető eredményeket szolgáltató) készülék, és kevés volt az elméleti és gyakorlati szakember. Ezek eredményeként az ultrahangvizsgálatról rossz vélemény alakult ki és a gyártóüzemek idegenkedtek tőle a sok selejttől való félelem miatt. A módszer hitelét az a szisztematikus és kitaró kísérleti munka állította helyre, amelyet elsősorban a Csepel Művekben, majd – egyebek között – az időközben (nem mellesleg Gillemot László által) létrehozott Vasipari Kutató Intézetben (VASKUT-ban) folytattak.

Az ultrahangvizsgálat hazai elterjedéséhez és fejlődéséhez jelentős mértékben járult hozzá a vasúti közlekedés biztonságának igénye, és az a munka, amit ennek az igénynek a kielégítése érdekében Magyar Államvasutaknál végeztek [29, 30]. 1957-ben a két sínszál egyidejű vizsgálatára alkalmas sínvizsgáló kocsit fejlesztettek ki és építettek, 5. ábra. A készülék kiemelkedő műszaki színvonalát még Herbert Krautkrämer, az ultrahangvizsgálat egyik apostola is méltatta magyarországi látoga-



5. ábra. A MÁV sínvizsgáló kocsija.



6. ábra. Herbert Krautkrämer méltató bejegyzése a MÁV sínvizsgáló kocsijáról.

tása alkalmával, 6. ábra. A következő lépést a készüléktechnika fejlődése (tranzistoros készülékek váltották fel az elektroncsöves ultrahangos készülékeket) segítette elő. Bevezették az egy ember által kezelhető, egy sínzásalás készüléket. Majd ezt követte a „MÁV Ultrahangos Sínvizsgáló Kocsija”, amelynek megalkotása és bevezetése azonban már a következő időszakra esett.

Hazánkban, csaknem úttörő módon már 1987-ben megalakult a Magyar Anyagvizsgálók Egyesülete. Az Egyesület a második világháború alatt – érthető módon – takaréklángon folytatta tevékenységét, majd a műszaki közélet fórumai világháborút követő újjászervezésének politika befolyásától sem mentes időszakában megszűnt létezni. 1949-ben megalakult a Műszaki és Természettudományi Egyesületek Szövetsége (MTESZ), amely mai is működik. A MTESZ keretein belül iparágak, illetve ágazatok szerint szerveződtek a tudományos egyesületek. A roncsolásmentes vizsgálatot az első időben érthető módon a röntgenvizsgálatban érdekelt szakemberek képviselték, akik Réti Pál vezetésével csatlakoztak a Híradástechnikai Tudományos Egyesület orvosi röntgen szakbizottságához. A Gépipari Tudományos Egyesület (GTE) 1949-ben történt megalakulását követően néhány évvel a szakcsoport már a GTE Technológiai Szakosztályának a keretein belül működött tovább. Később, ahogy a fejlődés megkívánta, szakbizottsággá növekedett, magába ötvözve a vas-, fém- és gépipari anyagvizsgálat más ágainak a képviselőit is. 1957-ben az anyagvizsgáló szakbizottság kivált a Technológiai Szakosztályból és a GTE keretében létrejött az önálló Anyagvizsgáló Szakosztály. A szakosztály első elnökének Gillemot Lászlót választották. Az Anyagvizsgáló Szakosztály szakbizottságai között kezdettől fogva megtalálható volt a roncsolásmentes szakbizottság, amelynek első elnöke Konkoly Tibor lett.

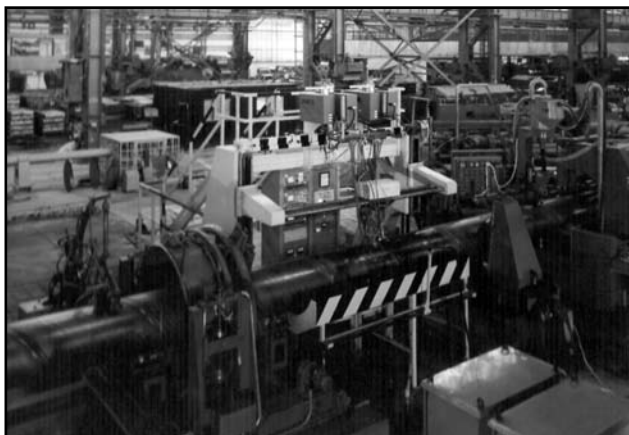
Megindult a roncsolásmentes vizsgáló berendezések fejlesztése és gyártása [9]. Ezek közül megemlíthjük a Röntgen és Orvosi Készülékek Gyárának Mobil, illetve a Trakis Szövetkezetnek a Liliput röntgenkészülék családját. Izotóptartókat és defektoszkópokat gyártottak a debreceni Kísérleti Fizikai Intézetben, a Csepel Művekben, az MTA Izotóp Intézetében és a Bányászati Kutató Intézetben (TAK gamma-defektoszkóp). A Fok-Gyem Szövetkezet Steelsorter néven forgalmazott és exportált magnetoinduktív vizsgáló berendezést, amelyet elsősorban keveredett acéltermékek szétválogatására használtak.

Az érett időszak

A következő két évtizedet (1970-80-as évek) az ország ipari fejlődése, a minőségi és biztonsági követelmények általános szigorodása, valamint a nagyberuházásokkal, mint például az olaj- és gázvezeték építésekkel és az atomerőmű építéssel együtt járó újszerű és igényes roncsolásmentes vizsgálati feladatok megjelenése jellemezte. Mindezek eredményeként jelentős fejlődésen ment át a hazai roncsolásmentes vizsgálat, a szó igazi értelmében éretté vált.

Ennek egyik szemléletes példája a Dunai Vasmű spirálcső üzemében folytatott roncsolásmentes vizsgálati tevékenység, majd a fejlődés csúcspontját képviselő komplex ultrahangos minőségsszabályozó rendszer kifejlesztése és üzembe állítása [16]. A kezdeti időszakban a gyártósorokra szerelt ultrahangos berendezésekkel és közvetlenül a gyártógépek mellé telepített röntgensugaras átvilágító készülékekkel bizto-

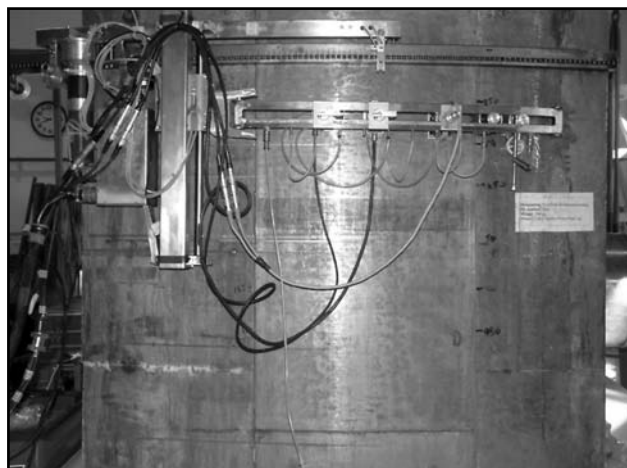
sítozták a spirálvarratos csövek hegesztési varratainak a 100%-os minőségellenőrzését. Ennek a kétlépcsős vizsgálati rendszernek az első lépcsőjeként (ultrahangos vizsgálat) egy gyors, szelektáló vizsgálat történt a gyártás ütemében, majd a második lépcsőjében (röntgenvizsgálat) a hibásnak osztályozott termékeket vizsgálták. A kétlépcsős rendszer eredményei nemcsak a termék megfelelőségét igazolták, hanem megfelelő információt szolgáltatottak a gyártási folyamat szabályozásához is. Később, tekintettel a minőségi követelmények szigorodására, valamint a tapasztalatokat felhasználva a kétlépcsős rendszert háromlépcsőssé fejlesztették. Ennek lényege az volt, hogy a röntgenvizsgálat felülvizsgáló szerepét átvette a hegesztési varrathibák kimutatására alkalmasabb ultrahangvizsgálat. A vizsgálat első lépcsője ekkor is a sorba beépített gépi ultrahangvizsgálat volt, a második lépcső pedig a korábban is alkalmazott röntgenvizsgálat, 7. ábra. Itt azonban bevezetésre került a „kérdéses” osztály, ami az ultrahangvizsgálattal hibásnak minősített, de a röntgenvizsgálaton megfelelt termékeket jelentette, és ezeket kézi ultrahangvizsgálatnak vetették alá (harmadik lépcső).



7. ábra. Spirálcső hegesztési varratának folyamatos ultrahangvizsgáló berendezése a Dunai Vasműben.

A fejlesztés csúcspontját a Dunai Vasműben a számítógépes ultrahangos minőség szabályozó rendszer képviselte, amelyre nyugodtan mondhatjuk, hogy a maga korában (70-es évek) a *state-of-the-art* színvonalat jelentette [31] (7. ábra). Ez három alrendszerből épült fel. A folyamatműszer alrendszer folyamatosan mérte a technológiai és minőségi paramétereket, amelynek legfontosabb részét az ultrahangos varrat- és palástvizsgáló berendezés képezte. A mérésadat-előkészítő alrendszer feladata az volt, hogy előkészítse (válogassa, csoportosítsa) a folyamatműszer alrendszer adatait a feldolgozásra. A harmadik, azaz a mérésadat-feldolgozó alrendszer értékelte a megfelelően előkészített adatokat és továbbította azokat a vezérlőpult kijelzőjére az operátornak.

A paksi atomerőmű blokkjainak a létesítése, majd még inkább az üzemeltetése különlegesen szigorú követelményeket támasztott a vizsgálatok megbízhatóságával szemben, ami érthető az atomerőmű potenciális veszélyessége tükrében. Az atomerőműben végrehajtott roncsolásmentes vizsgálatok sajátossága, hogy a vizsgálandó berendezés környezetében jelenlévő radioaktív sugárzás időben és térben korlátozza a vizsgálatok elvégezhetőségét. A vázolt körülmények előtérbe helyezték a legkorszerűbb vizsgálati technika, illetve a távirányítású manipulátorok alkalmazását. A szovjet szállítási blokkok tartozékaként üzembe helyezett reaktortartály vizsgáló rendszer robusztus volt ugyan, de sem érzékenységben, sem megbízhatóságban nem felelt meg a kor követelményeinek. Ezért ezt, hazai mérnöki munkát is felhasználva, igen hamar korszerűsítették, 8. ábra [32]. Az atomerőmű egyik kulcsfontosságú berendezése, a gőzfejlesztő hőátadó csöveinek a vizsgálatára a szállító nem adott megoldást, és egy korai meghibásodás



8. ábra. A paksi atomerőmű reaktortartályai gépesített ultrahangvizsgáló berendezésének manipulátora.

megerősítette azt az igényt, hogy egy multifrekvenciás, örvényáramos, manipulátoros kiszolgálású berendezést kell beszerezni és üzembe állítani [33]. Nagy lendületet adott az akusztikus emissziós vizsgálat- és méréstechnika hazai fejlődésének az, hogy Magyarország atomerőmű üzemeltető országgá vált. A vizsgálatot Pakson a reaktortartály időszakos nyomáspróbája során kezdték alkalmazni 1988-ban, és alkalmazzák a mai napig [34]. Az elméleti és kísérleti megalapozó munkát az MTA Központi Fizikai Kutató Intézet (KFKI) és a VASKUT fizikusai és mérnökei folytatták. Az akusztikus emisszióhoz kötődik a hazai roncsolásmentes vizsgáló berendezések gyártásának egyik sikertörténete. A Pakson (és később több helyen, külföldön is) alkalmazott műszereket a KFKI, majd később a KFKI bázisán önállóan működő kis hazai műszergyártó cégek végezték. A 9. ábra a 80-as évek (4 csatornás Defectophone) és a napjainkban használatos (32 csatornás Sensophone) akusztikus emissziós készüléket mutatja.

Ebben az időszakban teljessé vált ki a roncsolásmentes vizsgáló személyzet minősítése és tanúsítása. Maga a képzés már igen korán elindult, párhuzamosan a röntgen- és az izotópvizsgálatok terjedésével, a Budapesti Műszaki Egyetemen és néhány nagyvállalatnál. Az 50-es évektől a GTE vette át a képzés szervezését. 1959-től köti kormányrendelet a radiológiai vizsgálatok végzését képesítéshez [35]. Fontos lépés volt, amikor 1970-ben Magyarország csatlakozott a roncsolásmentes vizsgálatok világszervezetéhez (*International Committee for Non-Destructive Testing, ICNDT*), és lehetősége volt részt vennie a háromfokozatú képzési és tanúsítási rendszer kidolgozásában, amit 1985-ben törvénymódosítással tettek kötelezővé Magyarországon. A 80-as években először az osztrák roncsolásmentes társasággal (ÖGfZP), később a némettel (DGfZP) kötött megállapodást a GTE a tanúsítványok kölcsönös elfogadásáról. A mai napig alkalmazott EN 473 szabvány alkalmazását 1994-ben vezették be.

Köszönhetően Gillemot László nemzetközi tekintélyének, a 60-as évek közepétől Budapest egy igen jelentős és színvonalas nemzetközi anyagvizsgáló konferencia sorozat rendezvényeinek volt a helyszíne. A nemzetközi anyagvizsgáló konferenciák lehetőséget nyújtottak a roncsolásmentes vizsgálat területén dolgozó kutatóknak és gyakorló



9. ábra. Defectophone (baloldalon) és Sensophone (jobb oldalon).

mérnököknek, hogy eredményeiket nemzetközi szinten is megméri. A GTE Anyagvizsgáló Szakosztályának roncsolásmentes szakbizottsága a 70-es években indította el és rendezte meg két évente a roncsolásmentes anyagvizsgáló szemináriumot.

Az átalakulás időszaka

A 80-as évek második felében visszaesett hazánk gazdasága, majd a 80-as és 90-es évek fordulójának politikai és gazdasági változásai, ahogy másban, úgy a hazai roncsolásmentes vizsgálati tevékenység struktúrájában és teljesítőképességében is mély nyomot hagytak. Az időszakra jellemző privatizációs folyamat szétzilálta a roncsolásmentes vizsgálat korábban működő infrastruktúrájának nagy részét. Alapintézmények szűntek meg (pl. VASKUT) és velük együtt eltűnt a roncsolásmentes vizsgálattal kapcsolatos kutatás a hazai palettáról. Az anyagvizsgáló laboratóriumok többsége arra kényszerült, hogy a piacról éljen meg, amihez nem rendelkezett a megfelelő tőke- és eszköz-állománnyal, így nem volt versenyképes az új piaci szereplőkkel. Több kis (gyakran egyszemélyes) laboratórium alakult, amelyek erőfeszítése kimerült a napi üzletszerzésben és munkavégzésben, így esetükben továbbképzésről, fejlesztésről szó sem lehetett. Ugyan ezt az időszakot némi jóindulattal átalakulásnak neveztem, de nem hallgatható el az a tény, hogy az átalakulás eddigi eredménye nem feltétlenül pozitív. A roncsolásmentes vizsgálat nem szakítható ki az ország gazdasági teljesítőképességének egészéből, annak fejlődése szorosan összefügg azokkal a folyamatokkal, amelyek a műszaki, a gazdasági és a tudományos élet területén zajlanak.

Leépült az egyesületi élet. Ezt felismerve, a hazai roncsolásmentes vizsgálók egy csoportja 1997-ben megalapította a Magyar Roncsolásmentes Vizsgálati Szövetséget (MAROVISZ-t). Mára a MAROVISZ az egyedüli képviselője a hazai roncsolásmentes vizsgálatnak, és a Szövetség – tagjai bizalmára építve – képviseli a vizsgálókat (egyéneket és cégeket) itthon és külföldön. Teljes jogú tagja az ICNDT-nek és az európai szövetségnek (*European Federation for Nondestructive Testing, EFNDT*); két évente megrendezi a roncsolásmentes anyagvizsgálói konferenciát a hazai eszközforgalmazók és -gyártók kiállításával egybekötve; 2006 óta kiadja az Anyagvizsgálók Lapját; körvizsgálatokat szervez, és jelentős energiát fordít a személyzetképzés megújítására.

Zárszó

Kísérletet tettem arra, hogy egy előadás (illetve cikk) keretein belül áttekintsem a hazai roncsolásmentes vizsgálat történetét, aminek apropóját a Gillemot centenáriumi év adta. Ebben a munkában segítségemre voltak azok a nagy elődök, akik hasonlóképpen – ötven vagy akár csak tizenöt évvel ezelőtt – elvégezték ezt a munkát és leírták gondolataikat, köszönet érte nekik. Az áttekintésben nem volt lehetőségem kitérni a hazai roncsolásmentes vizsgálat minden szegmensére, tekintettel időbeli és területi korlátokra. Egyet kell értenem *Lehofer Kornél* szavaival, aki azt írta [9], hogy „...a részletgazdag kép összeállítása még hátravan. Ehhez még sok adatgyűjtő és elemző munkát kellene közösen elvégeznünk!” Bizom abban, hogy ez be fog következni.

Ha értékeljük a roncsolásmentes vizsgálat hazai történetének egészét, akkor meggyőződéssel kijelenthetjük, hogy nem kell szégyenkeznünk. Az ország teljesítőképességével összhangban (néhol még azt meg is haladva) folyt a megismerés és a tudás átültetése a gyakorlatba, mert minden időszakra megvoltak a maga tudói, mérnökei és gyakorlati szakemberei, akiknek ez köszönhető. Remélhetőleg ez a jövőben is így lesz.

Hivatkozások

- [1] Sperry, E.A.: Nondestructive detection of flaws, Iron Age, 122 (1928) pp. 1214-1217.
- [2] Rosteck, W.: Anwendbarkeit zerstörungsfreier Prüfverfahren im Brück-

- kenbau unter besonderer Berücksichtigung der Röntgendurchstrahlung, Glaser Annalen, 113 (1933) 1354, pp. 74-78 és 1355, pp. 89-92.
- [3] Mende J.: Fémek vizsgálata Röntgen-sugarakkal, Természettudományi Közlöny, LII (1920) 739-742, pp. 166-167.
- [4] Gillemot L.: A hegesztés röntgenvizsgálata, Anyagvizsgálók Közlönye, XIX (1941) 3 (május-június), pp. 85-164.
- [5] http://www.att.bme.hu/~femtech/index_elemei/Gillemot.htm
- [6] Palágyi G.: Adatok a nemzetközi és hazai anyagvizsgálat kialakulásának történetéhez 1927-ig, GÉP, XXVI (1974) 9, pp. 359-363.
- [7] Réti P.: Fél évszázad a hazai roncsolásmentes anyagvizsgálat történetéből, GÉP, XLIV (1992) 6, pp. 23-27.
- [8] Réti, P., Konkoly, T., Karsai, I.: NDT in Hungary, INSIGHT, 38 (1996) 3, pp. 177-182.
- [9] Lehofer K.: A honi anyagvizsgálat rövid története, Anyagvizsgálók Lapja, (1997) 3, pp. 61-71.
- [10] Trampus, P.: Evolution of the Nondestructive Testing in Hungary, Int. Congress History of Science and Technology, Budapest, Hungary (2009)
- [11] Réti P.: Az ultrahang anyagvizsgálat jelenlegi helyzete és néhány időszaki kérdése, Gép, 9 (1957) 4, pp. 131-136.
- [12] Réti P.: Rádióizotópok nehézipari alkalmazása, Gép, 9 (1957) 7-8, pp. 249-254.
- [13] Réti P.: A roncsolásmentes anyagvizsgálat új módszere a neutron-radiográfia, GÉP, XXII (1970) 12, pp. 458-459.
- [14] Jeszenszky S.: A röntgentechnika kezdetei Magyarországon, Magyar Tudomány, (1995) 9, pp. 1024-1037.
- [15] Anyagvizsgálat és minőségellenőrzés a Csepel Művekben (ed. Stork J.), Csepel Művek, Budapest
- [16] A minőségellenőrzés és az anyagvizsgálat története a Dunai Vasműben (ed. Klein A. M.), Dunatáj Kiadó, Dunaújváros, 2000.
- [17] 10 éves a Paksi Atomerőmű (ed. Vinnay I.), Publicitas-Pécs, Pécs, 1992.
- [18] Köteles Gy.: A röntgen-sugarak korai megjelenése hazánkban, Fizikai Szemle, 42 (1992) 4, pp. 140-143.
- [19] Hőgyes E.: Csontváz photographálás testen keresztül Röntgen szerint, Orvosi Hetilap, (1896) január 40/3, pp. 33-35.
- [20] Vaspánczél vizsgálata Röntgen-sugarakkal, Természettudományi Közlöny, XLVIII (1916) 647-648, p. 270.
- [21] Welwart B.: A vasbeton belsejének vizsgálata Röntgen-sugarakkal, Természettudományi Közlöny, XLIX (1917) 685-686, p. 771.
- [22] Mende J.: Fémek vizsgálata Röntgen-sugarakkal, Természettudományi Közlöny, LII (1920) 739-742, pp. 166-167.
- [23] Túry P.: A Röntgen-(X-)sugarak újabb alkalmazási köre az anyagvizsgálatban, A Magyar Mérnök- és Építész-Egylet Közlönye, 58 (1924) 7-8, pp. 27-28.
- [24] Mende J.: Anyagvizsgálat Röntgen-sugarakkal, Természettudományi Közlöny, 59 (1927) 848, p. 577.
- [25] Császár E.: A Röntgen-sugárzás technikai alkalmazása, Természettudományi Közlöny, 63 (1931) 935-936, pp. 401-417.
- [26] Császár E.: A Röntgen-sugárzás technikai alkalmazása (Befejező közlemény), Természettudományi Közlöny, 63 (1931) 937-938, pp. 463-469.
- [27] Vargha Gy.: Anyagvizsgálat Röntgen-sugarakkal, Pótfüzetek a Természettudományi Közlönyhöz, 66 (1934) 194-195, pp. 75-82.
- [28] Becker I.: Ifjan – Éretten – Öregén, 85 kérdés-válasz nyolc és fél évtizedről (beszélgetőtárs Tóth László), MAROVISZ, Budapest, 2010.
- [29] Kecskés S., Virág I.: Az ultrahangos sínvizsgálat gépesítése a MÁV-nál, GÉP, XXVI (1974) 9, pp. 354-359.
- [30] Virág I.: Ultrahangos vizsgálatok a vasútüzemben, GÉP, XXVII (1975) 10, pp. 378-385.
- [31] Tar J.: Számítógépes ultrahangos minőség szabályozó rendszer a spirálcsőgyártásnál, Gépgyártástechnológia, XXVI (1986) 5, pp. 212-223.
- [32] Trampus P.: Reaktortartály ultrahangvizsgálatának továbbfejlesztése, VIII. Roncsolásmentes Anyagvizsgálói Szeminárium Kiadványa, GTE (1992) pp. 73-79.
- [33] Trampus P.: Gőzfejlesztő hőátadó csövek örvényáramos vizsgálata, GÉP, XLI (1989) 9, pp. 335-336.
- [34] Pellionisz, P., Szűcs, P., Trampus, P.: Acoustic emission test of WWER-440 pressure vessel, Proc. 12th WCNDT, Elsevier, Amsterdam, (1989) pp. 1134-1136.
- [35] Konkoly T., Réti P., Dobrova L.: A roncsolásmentes anyagvizsgálók képzése és minősítése Magyarországon, GÉP, XXVII (1975) 10, pp. 400-402.

Wilhelm Conrad Röntgentől dr. Gillemot Lászlóig

Becker István

Wilhelm Conrad Röntgen életrajza

Wilhelm Conrad Röntgen 1846-ban született Németországban a Düsseldorf melletti **Lennepe**-ben. (ma Remscheid). Elemi iskoláit Hollandiában, **Appeldoorn**-ban végezte, mert az édesapjának ott volt posttőgyára. Polgári iskolába **Utrecht**-ben járt. Érettségi előtt három hónappal kizárták az iskolából, fegyelmi vétség miatt. Még magán úton sem tudott leérettségizni, mert görögből és latinból elégtelen volt.

A **zürichi** műszaki főiskola volt az egyetlen a német nyelvterületen, ahol érettségi nélkül folytathatta tanulmányait. (ezen a főiskolán végzett Albert Einstein is). Itt szerzett gépészmérnöki diplomát 1868-ban. Már a főiskolai tanulmányai alatt is a fizika felé fordult az érdeklődése, Robert Clausius „kinetikus gázelmélet” tárgyú előadásai miatt. Clausius August Kundt követte a kísérleti fizika tanszéken, aki felfedezte az ifjú Röntgen tehetségét és rábeszélte őt doktori „vizsgára” (Studium über Gase 1869). 1869-ben **Würzburg**-ban helyezkedett el August Kundt mellett, mint asszisztens.

A würzburgi egyetem, Kundt javaslata ellenére, nem nevezte ki magántanárnak, mert nem volt érettségije. Kundt, munkatársával Röntgennel 1872-ben **Strassbourg**-ba ment. Röntgen itt doktori „címet” szerzett és magántanár lett. 1875-től a **Hohenheimi** Akadémiára került, rendes tanárként. Az akadémiának azonban nem volt fizika-laboratóriuma. Ezért 1876-ban visszatért **Strassbourg**-ba, ahol Kundttal folytathatta kísérleteit. 1881-ben a **gießeni** egyetemre került a fizika-tanszék vezetőjeként 1888-ban a **würzburgi** egyetem professzora lett. 1895-ben **Lennepe**-ben, a saját laboratóriumában az **ismeretlen (X) sugárzást** fedezte fel. 1900-ban a bajor kormány felkérésére a **müncheni** egyetem professzora lett.

1991-ben első fizikusként kapta meg a **Nobel díjat**.

Az I. világháború alatt **Amerikában** tartózkodott. A világháború után visszatért **Münchenbe**.

1921-ben ment nyugdíjba. 1923. február 10-én (egyek források szerint 23-án) rákban halt meg (betegsége kapcsolatban lehetett saját sugaras kísérleteivel).

Szakmai életrajz

Wilhelm Conrad Röntgent „változatos életútja” folyamán számos kutatási téma kötötte le. Ilyen témák voltak:

- Ozmózis (Zürich).
- A levegő fajhője (Würzburg).
- A mágneses tér hatása a polarizált fényre hidrogén gázban (Strassbourg).
- Az elektromos tér hatása a polarizált fényre.
- Elektro optika (Gießen).
- A dielektromos polarizáció elektromágneses hatása.
- Saját töltéssel nem rendelkező dielektrikumok, állandó mágneses mezőben, elektromos áramot fejlesztenek = „Röntgenáram”.
- Katódsugárzás (Lenard féle kisülési cső) Würzburg 1889–1894.
- **Crookes féle katódsugár-csőből X-sugárzás, 1895 Lennepe (= Remscheid).**

Az X-sugárzás felfedezése

Kevés olyan korszakalkotó felfedezést ismerünk, mint Wilhelm Conrad Röntgen X-sugara, mely több mint 100 éve nem vesztett sem az orvostudomány (diagnosztika, terápia), sem a roncslásmentes anyagvizsgálatok gyakorlati felhasználásának a jelentőségéből.

1895. november 8-án Remscheid-Lennepe községben (Düsseldorftól keletre kb. 30 km) a saját laboratóriumában dolgozott Wilhelm Conrad Röntgen. Kutatásának témája a Hertz-Lenard féle katódsugárzás tanulmányozása volt.

Crookes féle katódsugárcsővének beállításakor meglepetéssel állapította meg, hogy egy fekete karton mögött lévő bariumtetracyanoplatinat réteggel bevont ernyő – messze a gázkisülési csőtől – fluoreszkálni kezdett. A jelenséget nem tudta a katódsugarakkal indokolni. Néhány egyszerű fogással bizonyította, hogy az ismeretlen sugárzás valóban a katódsugárcsőből származik, a sugárzás nem fény, se nem elektromosság. De hát akkor mi? Úgy tűnt, hogy ez, talán egy újfajta, „nem látható fény-sugárzás”. Az új sugarak könnyen áthatoltak a papíron, szöveten, fán. Ezt az ismeretlen sugárzást Wilhelm Conrad Röntgen a matematika ismeretlen jelével „X” - jelölte és X-sugárzásnak nevezte (X-ray).

Röntgen felfedezésének örömeiben és lázában minden, a háztartásában fellelhető anyagot, eszközt (könyvet, kártyát, üveget, hüvelyes borsót stb.) átsugárzott. A fluoreszkáló ernyőt felváltotta a fényérzékeny lemez, melyről könnyű volt másolatokat is készíteni.

Felfedezése olyan intenzív kutatásra készítette, hogy még az ágyát is a laboratóriumába vitette. Ott is étkezett. Felesége nem értette férje „elhidegülését” mindaddig, amíg Röntgen le nem ültette feleségét laboratóriumi asztalához és az asszony kezét 15 perc mozdulatlanúságra ítélve felvételt készített róla. Előhívás után felesége döbbenetben látta saját „csontvázát”, mely látvány a halált ébresztette fel benne.

Röntgen 7 hétig szinte éjjel nappal kísérletezett, hogy az addigi megfigyeléseit, megállapításait ellenőrizze és reprodukálja. Tapasztalhatta, hogy az ismeretlen sugárzást világos nappal is tanulmányozhatja, csak az érzékelő fényérzékeny lemezt kell fekete papírba csomagolnia.

Megállapította, hogy a rendelkezésére álló anyagok közül az ólom engedi át legkevésbé az X-sugarakat. Akkor még nem tudatosan, inkább ösztönösen ólomvédelmet készített kísérleteihez. (Sajnos csak később lett ismert az X-sugaraknak a káros hatása az élő szervezetekre, amikor már számos „radiológus” és „páciens” károsodott az X-sugaraktól.)

Wilhelm Conrad Röntgen számára néhány héten belül világhíressé vált felfedezésének – akkor még felmérhetetlen – értéke. Türelmetlenségét növelte az a tény, hogy a közelgő karácsonyi ünnepek miatt nem tudta eredményeit nyilvánosan bemutatni. Elhatározta, hogy felkéri a „Würzburgi Fizikai Orvosi Társaság”-ot hogy felfedezését – egyelőre – írásban ismertethesse. Publikációjának címe: „A sugárzások egy új fajtája”. Kutatásának részleteit e publikáció utolsó 10 oldala tartalmazta.

1896. január 1-jén újívi ajándékként kollegáinak elküldte X-sugár képeinek néhány másolatát abban a reményben, hogy ezek a tudósok majd támogatón fogják értékelni felfedezését.

A felfedezés futótűzként terjedt nemcsak a tudósok körében, hanem a sajtóban is. A nagy kapkodásban a Wiener Presse 1896. jan. 5-i számában sajtóhibával „Routgen X-sugarai”-ról számolt be.

1896. január 23-án este zsúfolva volt a „Würzburgi Fizikai-Orvosi Társaság” auditoriuma. Már órákkal előtte minden helyet elfoglaltak az X-sugárzás iránt érdeklődők. Conrad Röntgent már pusztá meglepetéssel nagy ovációval fogadták. Előadása folyamán is többször csatlant fel az elismerés tapsa.

Röntgen előadásának bevezetőjében a katódsugár fizika úttörőinek (Hertz, Lenard, Crookes) érdemeit és eredményeit méltatta, majd ismertette kutatásait és bemutatta néhány felvételét. Ezután felkérte a híres anatómust Albert von Köllikert, engedje meg, hogy a kezéről, ott az auditoriumban felvételt készíthessen. A felvétel sikerült. Kölliker nagy

lelkesezésében kijelentette: a Társaságban eltöltött 48 éve alatt nem vett részt ilyen fontosságú ülésen, majd azt ajánlotta, hogy az ismeretlen sugárzást ezentúl Röntgensugárzásnak nevezzék. Javaslatát a jelenlevők óriási tapsal fogadták el.

A röntgensugarak gyakorlati felhasználásának és alkalmazásának lehetősége számos üzletember fantáziáját megmozgatta. Leveleikkel, néha agresszív látogatásaikkal ostromolták Conrad Röntgent. Röntgen szerénységének igazolására legyen szabad Őt idéznem: „Az Egyetem legjobb tradíciójának szellemében az a véleményem, hogy az ott elért felfedezések az emberiséget illetik, sem szabadalmak, sem licencek, vagy szerződések sem befolyásolhatják azokat és semmilyen csoport sem gyakorolhat ellenőrzést felettük”.

Publikációjának és felvételeinek szétküldése után kitört a pokol körülötte. A dicsérő és elismerő levelek áradatától kezdve a felfedezését utánozni kívánók tanácskéréséig özönlöttek a levelek. Megszűnt a középkorú professzor nyugodt élete. Felesége is panaszkodott a nagy felfedezésnek a családi békéjükre gyakorolt hátrányos hatása miatt.

Kapott olyan leveleket is, melyben az írója azt állította, hogy az „X-sugárzást” már korábban felfedezte. Szomorúan tapasztalta Röntgen, hogy a látogatók számának növekedésével növekedett a felvételeinek „eltűnése” (ellopás!) is.

1901-ben, Stockholmban a királyi hercegtől vehette át az első fizikai Nobel díjat (Diploma, aranyérem, pénzjutalom). Röntgen visszautasította azt a kérést, hogy egy „Nobel díj előadást” tartson. Megköszönte a Nobel díj bizottság elismerő szavait, majd kijelentette, hogy munkájának elismerése bátorítja őt, hogy tudományos kutatásait, melyek az emberiség számára hasznosnak bizonyulnak tovább folytassa.

1920-ban Conrad Röntgen visszavonult a fizikai professzori állásából, de két laboratórium továbbra is a rendelkezésére állott.

Rudolf Grashey szavaival fejezem be Conrad Röntgen életútjának rövid ismertetését:

„Az élet olyan sokat adott Neki, de Ő többet adott nekünk, mint amit Ő kapott. Szellemének egy szikrája fényt gyújtott, mely a tudomány sötét útját megvilágította. **Hallhatatlan az Ő műve? Hallhatatlan az Ő neve?**

Radiográfia

Az X-sugárzástól a röntgenfelvételekig

Wilhelm Conrad Röntgen az X-sugarait laboratóriumi körülmények között fedezte fel. Lázás sietséggel vizsgálta az új, ismeretlen sugárzás természetét, kezdve a báriumtetracyanoplatinát ertyőfluoreszkálástól, a fekete papírba csomagolt fényérzékeny (fotó) lemez, előhívás utáni elfeketedéséig. A fotólemezek elé helyezett anyagok, tárgyak felismerhetők voltak. A feleségének kezéről készített „röntgenkép” tekinthető az első orvosi alkalmazásnak, míg a puskacsővéről készült felvétel az első műszaki röntgenfelvétel.

Az X-sugárzás híre szenzációként terjedt, mind orvosi, mind pedig műszaki körökben, de a gyakorlati felhasználást késleltette az alkalmas „röntgenkészülék” hiánya.

Conrad Röntgen fia és a hamburgi lámpa gyáros Richard Seifert fia iskolai osztálytársak voltak. A szülők ismerték egymást. Röntgen megkérte a lámpa gyárost, hogy gyártson egy a gyakorlatban is használható készüléket.

Számos próbálkozás után, **Richard Seifert 1928-ban** készítette el az első iparilag használható, piacképes „Isovolt” típusú röntgenkészüléket.

Gillemot László a budapesti Mechanikai Technológiai Intézet adjunktusa 1939–1940-ben szintén ilyen készülékkel végezte kísérleteit, doktori disszertációjához a hegesztési varratok hibáinak kimutatása témakörben.

A **röntgenkészülékek** utáni kereslet annyira megnőtt, hogy más cégek is elkezdtek röntgenkészülékeket gyártani (Müller, Baiteau, Andrex).

Az akkori röntgenkészülékek nagyfeszültségű villamos energiáját 2

db, 30–40 kg súlyú transzformátor (anód-transzformátor, katód-transzformátor) szolgáltatta. A transzformátoroktól kb. 100 mm átmérőjű, 3–5 m hosszú, nagyfeszültségű kábelek vezettek magához a röntgensőhöz. A röntgenső házában ólomköpeny volt, egy kis ablakkal. Magát az üvegcsövet (10^{-7} Hgmm vákuum) a buborékmentes hűtőolaj, illetve olajszigetelés vette körül. Az olajhűtésről, illetve a szigetelésről egy kis szivattyú gondoskodott. Végül egy kapcsoló szekrény tette lehetővé a vizsgálati paraméterek beállítását. A sugárzás áthatolóképességét (hullámhosszát) a feszültség (40.000–250.000 V) szabályozásával lehetett beállítani. A sugárzás intenzitását a mA (milliamper) mérő mutatta. Végül az expozíciós idő beállítására egy kapcsoló óra szolgált.

A sugárzás dokumentálására fényérzékeny anyagokra van szükség. Kezdetben a fényérzékeny emulziót üveglemezekre vitték fel, melyek csak sík-felületek vizsgálatára voltak alkalmasak. A cellulóz, majd poliészter alapú „**filmek**” kiszorították az üveglemezeket. A filmek érzékenységét azzal lehetett növelni, hogy a filmek mindkét oldalára felvitték az emulziót: 1898-ban az AGFA-nál (Aktiengesellschaft für Anilin Fabrikation). Az AGFA konkurenciája a belga Gevaert Photo Produktion Antwerpen csak 1929-ben kezdte el a „röntgen anyagok” gyártását. Az AGfa és a Gevaert később egyesült. Amerikában az Eastmann, KODAK fantáziánéven állított elő mindenféle fotóanyagot.

A filmek érzékenysége mellett, azok felbontóképessége (szemcse finomsága) is fontos paraméter.

Az expozíciós idő lerövidíthető úgy is, hogy a röntgenfilmeket sötétkamrában **erősítő fóliák** közé helyezik, majd fénymentesen becsomagolják (papír, gumitasak). A kalciumwolframát erősítőfóliák a röntgenfény intenzitásával arányos látható fényt bocsátanak ki, megnövelve a film előhívás utáni feketedését. A 120.000 Volt feletti „kemény sugárzáshoz” ólomfóliákat használnak (0,1 – 0,15 mm vastag!), mert ezeknek kisebb a szórt sugárzása.

A röntgenfelvétel készítésének utolsó fázisa a **filmek előhívása**: kicsomagolás, előhívás, közbenső mosás, fixálás, végső mosás, szárítás. Ez a „pepecselés”, főleg a száradás, miatt néha több órát vesz igénybe a labormunka, szemben a korszerű automata hívással, mely 8 perc!

A helyesen exponált röntgenfelvétel alapfeketedése 0,6–0,9. (gradációs görbe). Ebben az esetben a kép élessége a sugárzás hullámhosszától (feszültség), a sugárforrás méretétől (pontoszerű) és a film-fókusz távolságtól függ. Szabvány szerint a vizsgált anyag vastagságának 1%-os változása érzékelhető kell, hogy legyen. A képelesség ellenőrzésére a legjobban beváltak a „tűsorok” (különböző átmérőjű huzalok egymás mellett).

1939 előtt Magyarországon még nem volt röntgenkészülék. Gillemot Lászlónak meg kellett ismerkednie a fentebb leírt technológiákkal is. Ezek elsajátítása után térhetett rá a röntgenfelvételeken látható hegesztési eltérések (hibák) interpretálására. Ez igen magas fokú szellemi munkát jelentett, mert nemcsak a hegesztés technológiát kellett részleteiben ismernie, hanem a szerkezetek szilárdsági tulajdonságait is.

Misángyi Vilmos a Mechanikai Technológiai Tanszék vezetője, felismerve a roncsolásmentes anyagvizsgálat fontosságát, már a II. világháború előtt lehetővé tette adjunktusának Dr. Gillemot Lászlónak a röntgenvizsgálat gyakorlati alkalmazását.

A II. világháború után, Magyarországon, a Mechanikai Technológia tanszék Seifert Isovolt készüléke volt az egyetlen. Az „újjaépítés” fázisában a Kossuth-híd övlemezeinek vizsgálatától kezdve, az épülő erőművek hegesztési varratainak vizsgálatáig a tanszék ifjú gárdája végezte az akkor már tanszékvezető professzor Dr. Gillemot László vezetése mellett.

Prof. Dr. Gillemot László akadémikus rövid (rövidített) életrajza

Gillemot László 1912. október 7-én született Budapesten. Édesapja, Gillemot Ferenc ismert sportvezető volt. 1916-ban a román harctéren hősi halált halt.

Középiskolai tanulmányait 1930-ban fejezte be, majd beiratkozott a József Nádor Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem gépészmérnöki karára. Mint rendkívüli egyetemi hallgató a Pázmány Péter Tudomány Egyetemen matematikát, fizikát és filozófiát hallgatott. Gépészmérnöki oklevelet 1935. júniusban szerzett. Mérnöki pályáját a Standard Villamossági Rt-nél kezdte, de már 1935. szeptember 2-től haláláig a Műegyetem Mechanikai Technológiai tanszékének lett munkatársa: gyakornok, tanársegéd, adjunktus, magántanár, nyilvános rendkívüli tanár, nyilvános rendes tanár.

Gillemot szakismerete szervező készsége, egyénisége predesztinálta őt sok felelős vezető szerep vállalására:

- A Nehézipari központ tudományos osztályának vezetője.
- 1948-tól 1969-ig az Alumínium (majd Fémipari) kutató Intézet megalapítója és igazgatója. 1949-től a Vasipari Kutató Intézet megszervezése is a feladata volt.
- 1949-től a Magyar Tudományos Akadémia levelező tagja.
- 1954. szeptember 1-től 1957. 08. 01-ig a Budapesti Műszaki Egyetem rektora.
- 1964. 08. 01. – 1967. 06. 01. között az Egyetem tudományos rektorhelyettese.
- 1965-ben lett a Magyar Tudományos Akadémia rendes tagja.
- 1969-től a Jugoszláv Tudományos Akadémia levelező tagja.

Megszámlálhatatlan kitüntetései közül kiemelésre érdemes:

- 1949 Kossuth díj arany fokozata
- 1957 Kossuth díj ezüst fokozata (fémítán kutatás)
- 1949 Köztársasági Érdemérem ezüst fokozatát 1950-ben a (Népköztársasági Érdeméremre módosították).
- 1966-ban a Francia Tudományos Akadémia az „Ordre du Mérite pour la Recherche et l'Invention”
- 1972 Munkaéremrend arany fokozata

Társadalmi tevékenységeit is nehéz felsorolni:

- Magyar Anyagvizsgálók Egyesülete,

- Mérnök és építész egyesület,
- Magyar mérnökök és technikusok szabad szakszervezete
- Bányászati és Kohászati Egyesület
- MTESZ
- Magyar Tudományos Akadémia Kohászati Főbizottság
- Budapest városi tanács tagja
- Hazafias Népfront budapesti bizottsága
- Országos Béketanács tagja
- Kohó és gépipari miniszter műszaki tanácsának tagja
- Nehézipari miniszter műszaki tanácsának tagja
- Művelődési miniszter kollégiumának tagja
- Legfelsőbb bíróság műszaki ülnöke
- MTA gépészeti és kohászati szakcsoport
- MTA elméleti technológiai bizottság
- GTE tudományos bizottság
- BME gépészeti tudományos tanács
- BME egyetemi tanács és kari tanács
- Országos Műszaki Fejlesztési Bizottság

Nemzetközi szervezetek:

- International Institute of Welding (IIW) kormányzótanács tagja, majd alelnöke (Páris és London)
- C.I.R.F. College International pour l'Étude Scientifique des Techniques de Production Mécanique (Páris)
- Metals Society (London)
- International Congress on Fracture magyar nemzeti bizottság elnöke (Japán)

Tudományos és műszaki tevékenységét több szakkönyv és több mint 150 dolgozat igazolja.

A fentiekben két zseniális embert ismerhettünk meg. Az egyik, aki az X-sugarakat feltalálta, a másik, aki hazánkban azokat a roncsolásmentes anyagvizsgálat számára hasznosította.

Digitális röntgen vizsgálati eljárások

Balaskó Márton, Horváth László*

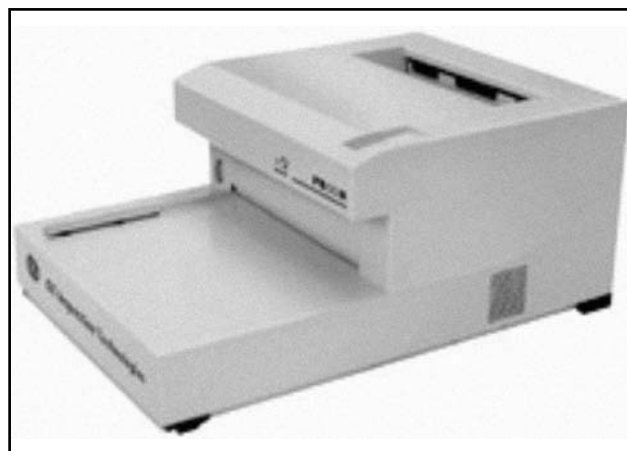
A digitális technika széles körű elterjedése tapasztalható a roncsolásmentes anyagvizsgálatok területén. A röntgensugárással végzett munka során elsőként a képfelvevő eszközökben került alkalmazásra, majd a felvételek kiértékelésében és a felvételek archiválásában vált nélkülözhetetlenné. A digitális adat tárolás nagy előnye, hogy az így tárolt adatok időállóbbak, mint a hagyományos adathordozók (pl. fotólemez) információi. Fontos viszont ügyelnünk arra, hogy a számítástechnika rengeteg eszköze könnyen meghamisíthatóvá teszi a képek hordozta információt. Természetesen vannak olyan röntgen vizsgálati módszerek is, ahol nem a képalkotási tulajdonságok miatt alkalmazzák a röntgen technikát, mint a röntgen diffrakció vagy a röntgen fluoreszcencia, azonban a „digitalizáció” ezeket a módszereket is elérte. Ezekről is említést teszünk.

Digitális röntgenkép készítés

Röntgen filmdigitalizáló

Nem lehet figyelmen kívül hagyni, hogy az elmúlt időszakban többnyire röntgen filmeket használtak a röntgen radiográfiai és radiológiai munkák során a felvételek elkészítésekor és azok archiválásakor. Elképzelhető, hogy a filmek tárolása milyen hatalmas hely igényt jár, akár a műszaki gyakorlatban, akár az egészségügyben felhalmozódó, kötele-

zően archiválendő anyagokra gondolunk. Ezért létrehozták a röntgen filmdigitalizáló készülékeket, amelyek segítségével az archiválás hely igényét, annak tört részére lehet csökkenteni, anélkül, hogy az eredeti film-felvétel minősége számottevően csökkenne [1]. Egy ilyen készülék fotója látható az 1. ábrán. Ebben a készülékben egy HeNe lézer világítja meg a filmet, amelynek intenzitását pontról-pontra kiolvassa egy speciális csatolású multiplier, vagy vonal kamera, amelyeknek a



1. ábra. Röntgen filmdigitalizáló

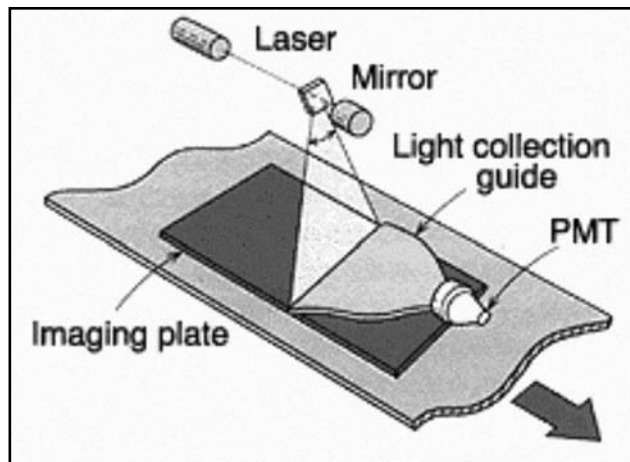
* MTA Energiatudományi Kutatóközpont

felbontása 50 μm . Az egyes pontok dinamika tartománya 12 bit (4096 szürkesség árnyalat). Valamennyi szabványos filmméret digitalizálására képes 35 cm filmszélességig, hossz méreti korlátozás nélkül. A feldolgozási sebessége egy 350 X 435 mm-es film esetén 2 perc.

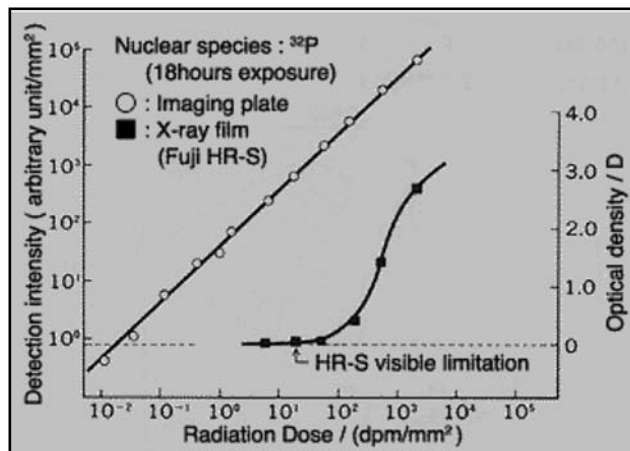
Röntgenkép felvételt készítés foszfor lumineszcenciás lemezzel

A XIX. század végétől az 1980-es évekig a röntgen film volt a röntgen vizsgálatok eredményeinek megjelenítésére és archiválására szolgáló egyedüli eszköz a műszaki gyakorlatban. Tudomásul kellett venni, hogy a film előhívása labor munkát igényelt, sötétkamrában. Ezen egy kicsit könnyítették a XX. század utolsó évtizedében tömegesen megjelenő automata, könnyen szállítható film előhívói, de azért ezekkel is volt elég üzemeltetési probléma. A röntgen film érzékenységének nem-lineáris sugárdózis függése, az alkalmazása során mindig gondot okozott.

A foszfor lumineszcenciás lemezek (a nyugati szakirodalomban „Imaging Plate”-nek nevezik és az IP rövidítést használják a jelölésére) felhasználásán alapuló, digitális röntgen technika sok tekintetben forradalmi változást hozott, a röntgenfelvételi technikában [2]. Ennek a lemeznek az anyagában a vizsgálati tárgy röntgen radiográfiai, látsens képe, töltésként örökítődik meg, amelyet akár több napig is képes megőrizni. A kiolvasás menetét vázlatosan mutatja a 2. ábra. A kiolvasóba helyezett lemezt, egy galvanikus tükör segítségével, HeNe lézerral világítják meg soronként, amely hatására a lemezben tárolt töltések, az azokat létre hozó röntgensugár intenzitásával arányos, fény felvillanásokat generálnak, amelyek szál optikával összekapcsolt multiplierbe kerülnek felerősítésre, majd egy A/D konverter digitalizálja azokat pontonként. Az eszköz felbontása 50 μm . Ez kétségtelen, hogy kissé



2. ábra. A foszfor lumineszcenciás lemez kiolvasásának vázlata



3. ábra. A foszfor lumineszcenciás lemez és a röntgen film érzékenységének,

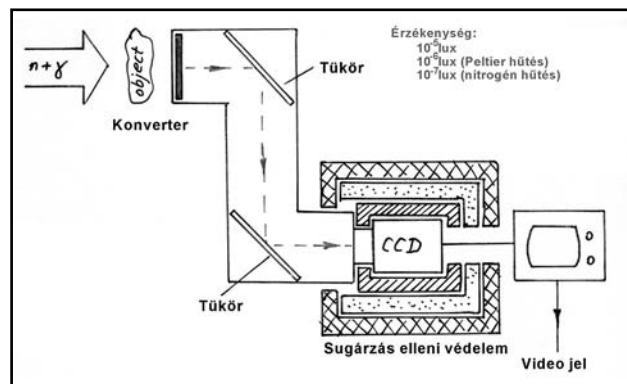
elmarad a legjobb röntgen filmek felbontásánál, de ennek e technikának nagyon sok előnye van a filmes módszerhez képest.

Sokkal nagyobb az érzékenysége, amellyel az átvilágítási idő csökkenthető tört részére, vagy a röntgensugárzás teljesítménye csökkenthető, így enyhébb követelményeket kell teljesíteni a szükséges sugárvédelmi intézkedéseknél. A lemez érzékenységének sugár dózis függése lineáris. A 3. ábrán láthatjuk a foszfor lumineszcenciás lemez és a röntgen film érzékenységének, valamint azok sugár dózis függésének összehasonlítását. Az elektronikus kiolvasott kép a vezérlő PC-be kerül. Itt el lehet tárolni, vagy el lehet végezni a felvétel kiértékelését, a digitális képfeldolgozási technika minden transzformációs lehetőségét kihasználva, az eredeti felvétel információ tartalmának megőrzése mellett. A kiértékelte felvételt elektronikus úton el lehet juttatni a megbízóhoz, de video-konferencia keretében más kollegákkal is meg lehet vitatni az érdekesebb sajátosságokat. A lemez integrális típusú detektor és kiolvasás után egyszerűen törölhető, legalább 1000-szor újra használható. Nem igényel sötétkamrát, de ultra-ibolyán túli sugárzásnak nem szabad érnie (mert törődik). Nincs szüksége vegyszeres kezelésre, tehát elkerülhető a hosszadalmas, vegyszer megsemmisítési eljárások lefolytatása. A telepítésekor nem kell különleges infrastrukturális igényeket kielégíteni. Elegendő a fokozott tisztaság. A megfelelően kiképzett és nagy gyakorlattal rendelkező RT-3 és RT-2 mű-nősítéssel rendelkező anyag vizsgálatok rövid időn belül (1-2 hét) elsajátíthatják a kezelését.

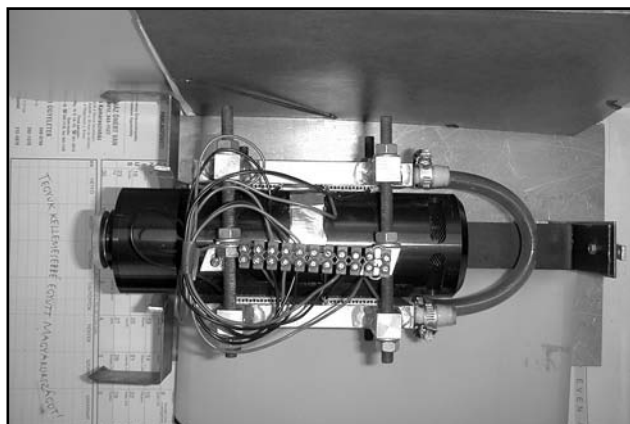
Röntgenkép felvétel készítése CCD kamerával

A félvezető ipar fejlődésében az 1980-as évek robbanásszerű gyártástechnológiai áttörése (nagy tisztaságú, nagyméretű szilícium egykristályok tömeggyártása), lehetővé tette a CCD kamerák érzékelő lapkáinak előállítását. A lapkákban a fotóeffektus hatására, a beérkező fény mennyiségével arányos nagyságú töltés halmozódik fel az inverziós rétegben. Az összegyűlt töltés nagyságát megmérve következtethetünk a beérkező fény mennyiségére. Meg kell jegyeznünk, hogy a lapkákban töltött részecske sugárnyalábbal való kölcsönhatás során is létre jön a töltés felhalmozódás. A különleges gyártási technológiával készülő lapkával ellátott CCD kamerákat használják a közvetlen (direkt) radiográfiai munkákban detektorként. A félvezető alkatrészek nagy többsége azonban nem rendelkezik megfelelő sugár állékonysággal, ezért csak alkalmas elrendezésben és elegendő sugárvédelmi anyagot tartalmazó környezetben szabad használni a CCD kamerákat, amint az a 4. ábrán látható.

A nagyérzékenységű CCD eszközt nem szabad a direkt nyalábbba helyezni. A vizsgálati tárgy sugárzás által keltett, a sugárzás-fény átalakító konverteren megjelenített radiográfiai képét, tükör segítségével kell, a megfelelő sugárvédelmi árnyékolásban elhelyezett kamerához juttatni. Az érzékelő lapkán (chipen) nem csak a sugárzás, hanem a hő mozgás miatt is elszabadulhatnak (sötét áram) töltések [3]. Ez a jelenség erősen függ a lapka hőmérsékletétől. Ezért célszerű annak felületét hűteni. Példaként megemlítjük, hogy egy asztromia jelenségek megfigyelésére használt CCD kamera érzékenysége szobahőmérsékleten 10^{-5} lux, két körös, vízűtéses Peltier elemek között, -70°C -on, 10^{-6} lux, míg cseppfolyós nitrogénnel hűtve, -190°C -on 10^{-7} lux volt. A



4. ábra. Nagyérzékenységű CCD kamera felvételi környezetben

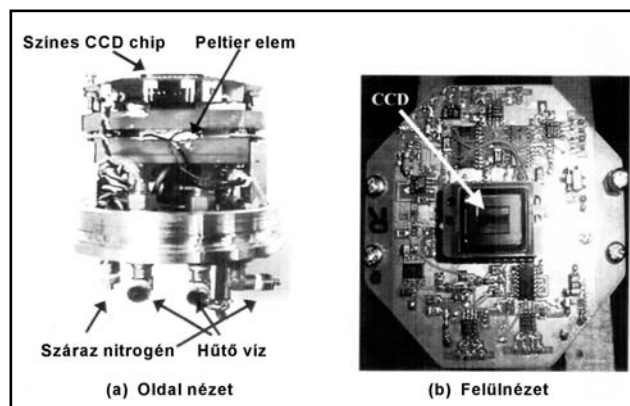


5. ábra. CCD kamera zaj csökkentése, utólagosan felszerelt víz hűtéses Peltier modulokkal

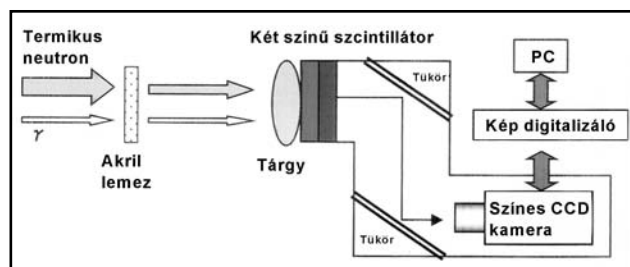
CCD kamerák hűtésén utólag is lehet javítani, amint azt az 5. ábrán lehet látni. Ebben az esetben az egész kameraházat sikerült lehűteni vízhűtéses Peltier modulokkal, 45 C°-ról 15 C°-ra, ami jelentős képminőség javulást eredményezett.

Japán mérnökök, kutatási célra kifejlesztették a nagy érzékenységű és nagy felbontású, színes CCD kamerákat. Amelynek fényképe a 6. ábrán látható. Az alkalmazását a 7. ábrán láthatjuk.

A képfelvévő lapkát két körös, vízzel hűtött Peltier elemmel hűtik, a lefűvátásra száraz nitrogént használnak. Fő alkalmazási területe az egyidejűleg használt, komplex neutron- és gamma radiográfiai mérés technika. Az elrendezés vázlata a 7. ábrán látható [4]. A Toshiba cég által gyártott szcintillátor lemez a neutronsugárzás által keltett képet piros színnel, míg a gammasugárzás által keltett képet zöld színnel jeleníti meg. Meg kell említeni, hogy a CCD technika elterjedése előtt is használtak a radiográfusok vidicon csöves tv kamerákat [5], azonban ezek képfelvételi ideje 40 msec volt, ezért képerősítő egységet kellett hozzájuk illeszteni, ami jelentős költséggel járt, azonkívül az is némi zajnövekedést eredményezett.



6. ábra. Nagy érzékenységű és nagy felbontású, színes CCD kamera nézeti képei



7. ábra. Színes CCD kamera alkalmazása az egyidejűleg alkalmazott komplex, neutron – és gamma radiográfiában

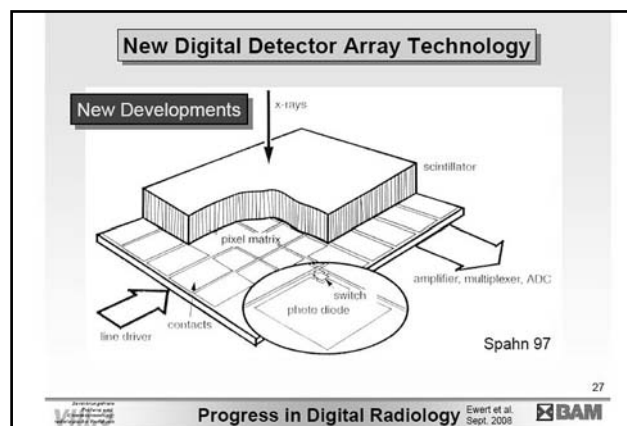
Röntgenkép felvételek készítése Flat-Panel detektor lemezzel

A technika lényege, hogy a felvételek detektor lemezre, úgynevezett flat panelekre készülnek, amelynek vázlata 8. ábrán látható.

A detektor lemez egy konverter réteggel fedett, az elektromos jelet érzékelő, vékonyfilm tranzisztor panel. A konverter rétegben a röntgensugár feszültségkülönbséget indukál és elektronnyalvak alakulnak ki a sugárzás intenzitásától függően. Ezt az elektromos jelet fogja fel a vékonyfilm tranzisztorpanel. Az elemi pixeleket alkotó tranzisztorok mérete 100X100 mm. Az elektromos jelek soronként és oszloponként kerülnek kiolvasásra. Egy lemez 2048 X 2048 elemi tranzisztort tartalmaz. Az eszköz lineáris és 12 bit a dinamika tartománya. A lemez mérete 300X400 mm [6]. A kiolvasási sebessége igen nagy, 40 msec/kép, ami azt jelenti, hogy megfelelő teljesítményű röntgen sugárforrás alkalmazása esetén, a vizsgálati tárgyat mozgás közben is tanulmányozhatjuk. A detektorpanel vezeték nélkül kommunikál a megfelelő számítógépes rendszerrel, nincs közbülső kiolvasó interface egysége, tehát könnyen mobilizálható és így lehetőség nyílik a röntgen computer tomográfiai (CT) technika ipari alkalmazásának elterjedésére is, amint ennek a nukleáris ipari és repülés ipari felhasználását láthatjuk a 9. ábrán. Egyébként lehetőség van a radoszkópiai technika alkalmazására is. Ez utóbbi azt jelenti, hogy video technikával megjeleníthetővé válnak a tárgyak belsejében történő változások.

(A digitális felvételeken lehetőség van az utólagos processzálásra is pl. kiértékeléskor való fényerő- és kontrasztbeállítás). A szervereken, digitális archívumokban könnyen előkereshetők a vizsgálati tárgy előző felvételei, így az összehasonlító ellenőrzései is könnyebben elvégezhetők. A felvételek digitális címkékkel megjelölhetők, válogathatók, csoportosíthatók, ami nagyban segíti az oktatást és a tudományos tevékenységet.

Napjainkban sok szó esik a CERN-ben folyó kutatásokról, itt most egy a röntgen CT alkalmazásával kapcsolatos vizsgálatot mutatunk be.



8. ábra. Flat-Panel detektor elvi felépítése

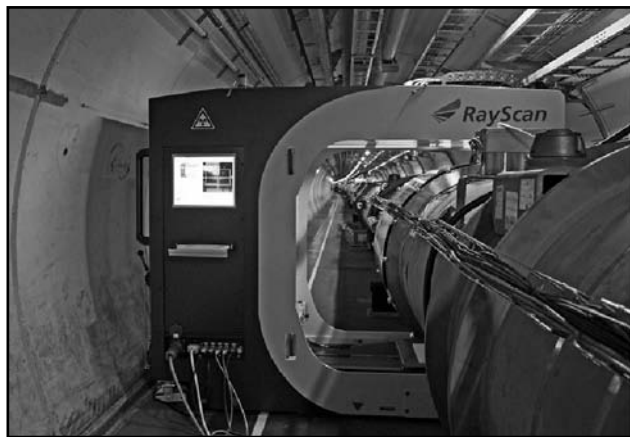


9. ábra. Hordozható ipari röntgen tomográfiai berendezés

RÖNTGEN VIZSGÁLATOK

Ez a berendezés a CERN Large Hadron Collider (LHC)–jének, egyik karbantartására szolgáló mobile CT eszköze, amelyről szó van [6]. Az LHC néhány paramétere: az alagút kerülete 26,65 km, az alagút átmérője 3,8 m, mindez 100 m mélyen a föld felszíne alatt. A részecske nyalábokat maximálisan 14 TeV energiával lehet ütköztetni, ilyenkor a nyaláb közepén a részecske sűrűség eléri a 10^{34} -t $\text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$ -ként. Ezt a nyalábot szuper folyékony héliummal hűtött (1,9 K°) szupravezető mágnesekkel tartják a repülési cső tengelyében. 7500 szupravezető mágnes veszi körül az LHC-t. Ezek 1232 fő-dipól gyűrűbe és 438 fő-quadropól gyűrűbe vannak szerelve. Az előbbiek 15 m hosszúak, míg az utóbbiak 8 m hosszúak. Így az alagútban 22,5 km-t töltenek ki. Ezek szerelésekor ~40000 plazma-hegesztést végeztek és több, mint 60000 összeköttetést alakítottak ki a szupravezető mágnesek között. A rendszer ellenőrzésére bontás nélküli NDT technikát kell alkalmazni, mert az alacsony hőmérséklet hőszigeteléséhez és a részecskék mozgásának a biztosításához „nagy” vákuumot kell biztosítani. Csak a radiológiai vizsgálatot lehetett kivitelezni a rendszer összetett jellege miatt, mivel a hibahely meghatározása nagyon fontos volt, ezért a választás a röntgen CT-re esett. Létrehozták a RayScan Mobile készüléket, amely a 10. ábrán látható, amint az LHC-n CT felvételt készít. Sugár forrásként 225 kV-os mini röntgen készüléket, míg detektorként 400 mm X 400mm méretű Flat Panel (FP) került alkalmazásra. Az FP 2048 X 2048 pixelt tartalmaz.

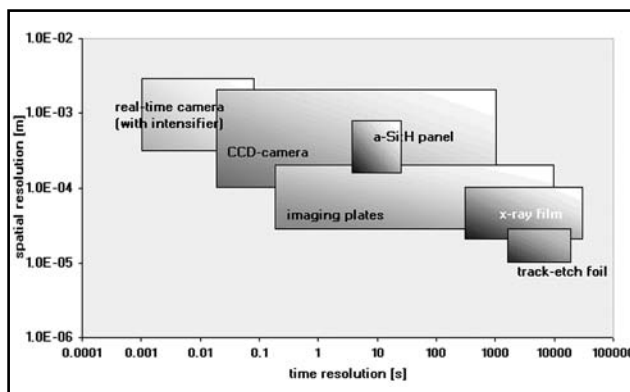
Egy pixel mérete 0,2 mm X 0,2 mm. A felvételező rendszer haladását és forgatását, egy négytengelyű szervo rendszer biztosítja. A képkalkoló egység mindkét tagja plusz-mínusz 45°-ra elfordítható. Egy felvételi beállításból maximum 1,2 m-es részről készülhetnek képek. A vizsgálat során az FP-val valósidejű radioszkópiai felvételeket vesznek fel folyamatosan, és azok el lesznek tárolva. Amennyiben kétséges állapotú (hiba gyanús) helyhez érnek, ott komplett CT felvétel készül. A RayScan Mobile készülék üzemelése során, biztonsági előírásként, előtte és mögötte 100 méteres távolságban lezárják az LHC alagútját.



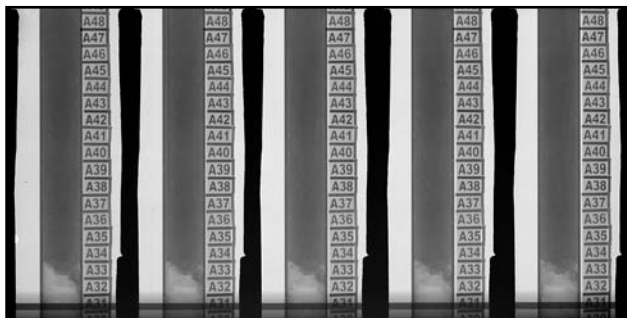
10. ábra. A RayScan Mobile készülék CT vizsgálatot végez az LHC-n

A digitális röntgen vizsgálatok detektorainak rövid áttekintése

Eddig kevés szó esett a detektor eszközök időfelbontásáról, amelyet a 11. ábrával teszünk érzékelhetővé. A statikus kép rögzítésére szolgáló detektorok, többnyire nagy felületű, lemez formátumú eszközök (röntgen film, imaging plate és az első generációs Flat-Panel detektorok, valamint a régi típusú CCD kamerák, amelyek felbontása igen jó és többnyire kétdimenziós felvételek készítésére alkalmasak. Az átlagos felvételi idejük 1 másodperc és 1 óra között változik, a vizsgálati tárgy anyagától és radiális vastagságától, valamint az alkalmazott átvilágítási röntgen teljesítménytől függően. A röntgen film kivételével azonban ezekkel a detektorokkal is lehet 3 dimenziós képekhez szükséges felvétel sorozatokat készíteni. A legbonyolultabb eljárást az imaging plate-val készült felvétel sorozat elkészítése igényli. Ismeretes, hogy egy jó minőségű



11. ábra. A digitális röntgen detektorok speciális felbontás és időfelbontás függése



12. ábra. Röntgen tomográfiai felvétel sorozat részlet, egy meghibásodott szabályzó rúdról

tomográfiai kép rekonstrukálásához 180 darab, a vizsgálati tárgy 1 fokoskénti elforgatásával előállított, radiográfiai felvételre van szükség. Tudjuk, hogy egy IP lemezre maximum 1000 felvétel készíthető, így a meglehetősen drága detektor lemez, öt felvétel sorozat elkészítése után, gyakorlatilag használhatatlanná válna. Ezért csak akkor vállalható ez a felvételi technika, ha a tárgy mérete csekély és legalább öt felvétel készíthető egymás mellé róla egy lemezre, megfelelő takarás- és távvezérelt lemezmozgatás alkalmazásával. Erre látunk példát a 12. ábrán, ahol egy meghibásodott szabályzó rúdról készült felvétel sorozat részlet látható, amelyen öt, különböző szögben exponált radiográfiai felvétel helyezkedik el egy 20 X 40 cm-es lemezen, kölcsönhatások nélkül [7].

Dinamikus radiográfiai felvételek csak a korszerű Flat-Panel és CCD kamerákkal készíthetők, amint ez a 11. ábra alapján megállapítható. Itt is létezik kivétel, mert ha a hagyományos vidikon felvevő csöves kamera elé illesztünk egy elektronikus képerősítőt, akkor annak a segítségével tanulmányozhatóak lesznek a vizsgálati tárgy belsejében lejátszódó mozgással járó események. Természetesen ilyenkor a kép egy kissé zajossá válik, ami a felbontás romlásával jár.

Végül a digitális röntgen radiográfia képfelvevő egységeinek főbb paramétereit tekinthetjük át az 1. táblázatban. Kétségtelen, hogy alkalmazástechnikailag a Flat-Panel típusú eszközök használatba vétele tűnik a legelőnyösebbnek. Azonban tudnunk kell, hogy a planár tranzisztorok átmeneti rétegei, a 100 kV feletti besugárzási teljesítmény,

1. táblázat

Detektor rendszer	Rtg film digitalizálás	Szcintillátor+ CCD kamera	Imaging Plates	Amorf Si Flat Panel
Felbontás (pixel méret μm)	20 – 50	100 – 500	5–25–50–100	100
Típusos exponálási idő	5 min	40 msec–10 sec	20 sec	40 msec–10 sec
Detektálási terület	18 X 24 cm ²	25 X 25 cm ²	20 X 40 cm ²	30X40cm ²
Vonal menti pixel szám	4096	2048	6000	1750
Dinamikus érzékenység	10^2 (nem lineáris)	10^5 (lineáris)	10^5 (lineáris)	10^5 (lineáris)
Digitális dinamika	10 bit	16 bit	16 bit	14 bit

tartós használat esetén meghibásodnak. Az IP lemezek használata során is kerülni kell a szükségtelenül nagy besugárzási teljesítmények használatát, mert a lemezek „beéghetnek”. Ezt szűrők és részleges takarások alkalmazásával kerülhetjük el. A megnövelt idejű törlés a „beégési” hegek kezelésében nem szokott eredményes lenni, mert a túlzott felmelegedés hullámossá teszi a lemezt.

A teljesség igénye nélkül közléseinknek néhány fontos szabványt, amelyek ismerete, nélkülözhetetlenül fontos a digitális röntgen vizsgálatokat végző szakemberek számára.

E 2445 – 05 Long term stability

E 2446 – 05 Classification

E 1000-92 Standard Guide for Radioscopy

E 1411-91 Standard Practice for Qualification of Radioscopic System

E 1255-92 Standard Practice for Radioscopy

New Standards on Digital Industrial Radiology	
EN 13068	Radioscopy
EN 14096, ISO 14096	Film Digitisation
EN 14784 CR	Part 1: Classification of Systems, Part 2: General principles
ASTM CR	Classification (E 2446), Long term stability (E2445), Guide (E 2007), Practice (E 2033)
ASME (BPVC, S.V. XI) CR Code Case 2476	Radiography (CR) with Phosphor Imaging Plates
ASTM E 2597	Characterisation of DDAs by manufacture
ASTM E 07	DDA practice under development
ASTM E 2422	First digital catalogue, light alloy casting digitized films from ASTM E 155 (BAM)
- EN 1435 Teil 1 NDT of welds: Film	
- EN 1435 Teil 2 NDT of welds: CR	

A teljesség igénye nélkül megemlítnék két további röntgen vizsgálati módszert, amelyek alkalmazása egyre nagyobb teret kap a tudományos és műszaki életben egyaránt.

Röntgen diffrakció

A röntgen diffrakció esetében röntgensugarak hajlanak el az atomok elektronburkán. A két vagy több atomról szórt sugárzás interferál egymással, és a fényképező lemezen, vagy az IP lemezen szabályosan elhelyezkedő foltokból álló interferenciakép jelenik meg [8]. Ebből egykristályos, szilárd anyagból álló mintánál meghatározható az atomok pontos helye az elemi cellában. A foltok méretéből következtetni lehet az atomok minőségére is. A módszer nagy molekulák (pl. fehérjék), kisméretű, gázállapotú molekulák és porok szerkezet-vizsgálatára is használható.

Kapott információ:

- rácslátlás (kötéshossz)
- kötéstípus
- kémiai minőség

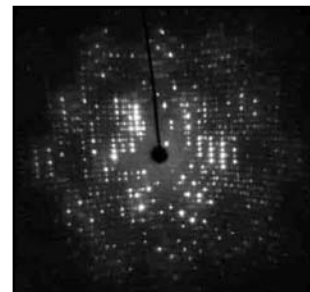
A röntgen diffrakciós berendezés elvi rajza az 13/A. ábrán látható, míg egy korszerű röntgen diffrakciós készülék az 13/B. ábrán látható. A foto lemez helyettesíthető IP lemezzel és a 15. ábrán látható por-



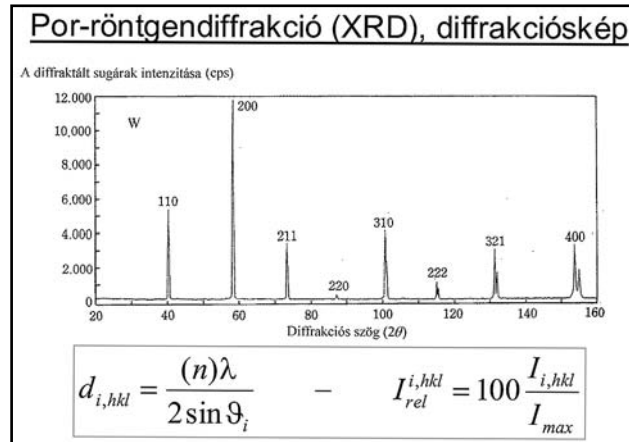
13/A. ábra. Röntgen diffrakció elvi felépítése

13/B. ábra. Egy modern röntgen diffrakciós műszer fotója mérés kiértékelése digitálizálható

diffraktogramon a kristályrácsot jellemző ($dhkl$) rácscik távolságoknak megfelelő (2θ) szögeknél intenzitás maximumokat kapunk. A diffraktogramon minden egyes csúcs egy-egy (hkl) rácscik seregnek felel meg. A reflexiók indexelése alapján meghatározható a minta rácsparamétere, a megfelelő adatbázisok használatával. Az ötvöző atom rácsparamétere alapján meghatározható annak koncentrációja és szemcsemérete a diffrakciós vonalak szélességéből.



14. ábra. Diffraktogram



15. ábra. Por-röntgen diffrakciós kép szerkezet meghatározásra

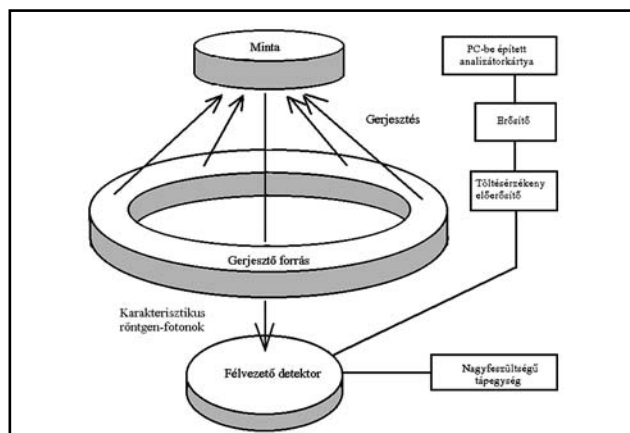
Powder Diffraction File (PDF) adatbázis: fázisazonosítások, fáziselemzések

- Az adatbázis megjelenési formái (katalógus kártyák, könyvek, CD-ROM, relációs adatbázis PDF-4/Full, PDF-4/Organics)
 - ICDD (International Centre for Diffraction Data), kb. 6000 USD.
 - BME-OMIKK 1993-ig kártyák + könyvek; CD-n az újabb beszerzésű diffraktométerekhez (2006-2010, Szervetlen és Analitikai Kémia Tanszék)
 - Indexek (Alphabetical Index, DDView-programok), Kereső könyvek (Hanawalt Search Index, Sieve-programok)
 - Inorganic Phases
 - Organic and Metal-organic Phases
- A kísérleti fázisok azonosítása (adatbázis forráskód, set- és kártyaszám megadása)
 - Előismeretek hasznosak a kiindulási anyagokról, a vegyületekben várhatóan előforduló elemekről,
 - A mért nagyintenzitású csúcsok, de lehet, hogy a referencia kártyán szereplő összes jelentős intenzitással bíró rácstávolságok (λ) a mérési hibákban belül egyezést mutatnak a kísérleti értékekkel
 - Számítógépes kereső-összehasonlító (Search - Match) algoritmusok segítségével generált valószínűségi lista kritikai értékekkel
 - Por-diffrakciós referenciakártya hiányában az egykristály diffrakciós adatbázisokból elérhető szimulált portfelvételek segítségével hívásával.
 - Rietveld-analízis (szerkezet portfelvételtől, fázisarányok illesztése az intenzitás arányokra)

Röntgen-fluoreszcencia

A röntgen-fluoreszcencia módszer lényege, hogy valamely kis energiájú röntgen-, vagy gamma-sugárral a minta atomjainak belső elektronjait kiütjük [9]. Ilyenkor magasabb energiaszintről ugrik be egy elektron a lyukba, és az atom a két nívó energiakülönbségének megfelelő energiájú karakterisztikus röntgensugárzást bocsát ki. Ezt a választ hívjuk röntgenfluoreszcenciának. Az elemeket a kilépő röntgen-foton energiája alapján ismerhetjük fel, hasonlóan ahhoz, amikor a rádió-állomásokat a frekvenciájuk alapján azonosítjuk ($E=h \cdot \nu$, ahol E a foton energiája, h a Planck-állandó és ν a foton frekvenciája). A röntgen-fotonok energiája a megfigyelések szerint a rendszám négyzetével arányos. A kibocsátott karakterisztikus sugárzás intenzitásából a hatásokok és az önnyelődés meghatározása után az adott elem koncentrációja meghatározható. Így a röntgen-fotonok energiája alapján lehet minőségi-, az intenzitásuk alapján pedig mennyiségi analízist végezni.

A röntgen-fluoreszcencia analízis (RFA) roncsolásmentes atom-



16. ábra. Röntgen fluoreszcens mérőberendezés elvi vázlata

fizikai anyagvizsgálati módszer. Rövid idő alatt el lehet vele végezni anyagminták minőségi analizisét. Azt, hogy egy gyűrés anyaga arany-e, vagy réz, néhány perc alatt el lehet dönteni. Miután a módszer roncsolásmentes, semmilyen nyomot nem hagy a mintán. A hordozható RFA berendezések lehetőséget adnak lényegében bármely helyszínen mérésekre, ez biológiai és környezeti méréseknél nagy segítséget jelent. A mérés elvi vázlata a 16. ábrán látható.

Következtetés

A digitális röntgen vizsgálatok előnye, hogy a felvételi körülmények sok tekintetben egyszerűsödtek, az új detektor rendszerek, új módszerek (CT, dinamikus radiográfia) alkalmazását tették lehetővé, amely sokoldalúbb ismeretek megszerzését teszik lehetővé. Az eredmények kiértékelésében és azok tárolásában további előny, hogy az így tárolt adatok időállóbbak, mint a hagyományos adathordozók (pl. fotólemez) információi, amelyek könnyen sérülhetnek vegyi, vagy mechanikai

hatásokra. Fontos viszont ügyelnünk arra, hogy a számítástechnika rengeteg eszköze könnyen meghamisíthatóvá teszi a képek által hordozott információt. Amint láttuk, sok esetben segít bizonyos természetű elemek kihangsúlyozása, vagy elnyomása, ezen eszközök alkalmazása azonban a valótól eltérő eredményre vezethet. Mivel a beavatkozásoknak általában nyoma sem marad, ezért felelősséggel és figyelemmel használjuk a képfeldolgozás adta lehetőségeket!

Irodalom jegyzék

- [1] www. MAROVISZ Digitális Radiográfia tanfolyam, felelős kiadó: Dr. Trampus Péter, Miskolc, 2008 november 27- 28, Röntgen filmdigitalizálás
- [2] Amemiya and Miyahara, Nature 336 (1988) 89.
- [3] H. Kobayashi, et al, Neutron radiography using cooled CCD camera, Proc. WCNR-3, Edited by Shigenori Fujine, Osaka, Japan, May 14-18, 1989, 421-428 pp.
- [4] Koch-ichi-Mochiki, et al, Neutron gamma radiography using a two color luminescent scintillator, Applied Radiation and Isotopes 61, Issue 4, October 2004, 497-501 pp.
- [5] J.T. Lindsay, et al, Real time neutron radiography and its' application to the study of Internal combustion engines and fluid flow, Proc. WCNR-2, Edited by J.P. Barton, Paris, France, June 16-20, 1986, 579-586 pp.
- [6] Balaskó M. és Trampus P.: Beszámoló a 10. ECNDT konferenciáról, Anyagvizsgálók Lapja, felelős kiadó: Dr. Trampus Péter, 20. évfolyam, 2010, 3-7 old.
- [7] M. Balaskó, E. Sváb, Z. Kiss, A. Tanács, A. Nagy and A. Kuba: Study of the inner structure of a damaged control rod by neutron- and X-ray radiography and discrete tomography, Conf. Proc. of WCNR-8, Gaithersburg, USA. October 16- 19, 2006, 294-303 pp (2008).
- [8] J. M. Schultz: Az anyagvizsgálat diffrakciós módszerei, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1987.
- [9] www. atomfizika.elte.hu/kornyfizlab/ml/nfs.html – 46k

Az ipari komputer tomográfia vizsgálati lehetőségei

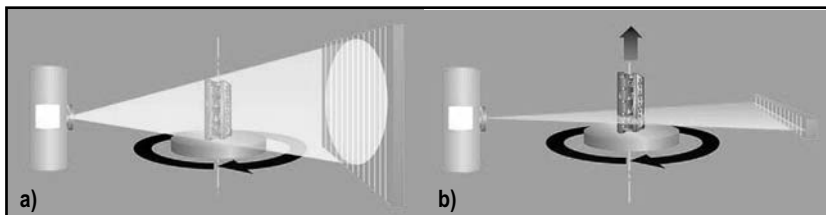
Czinege Imre¹, Kozma István¹,

Az ipari komputer tomográf működési elve

Az ipari CT az orvosi diagnosztikai eszközhöz hasonlóan kétdimenziós röntgen felvétel sorozatot készít a vizsgálandó objektumról úgy, hogy a tárgyasztal és az azon felfekvő alkatrész egy kis szöggel sorozatosan elfordul. Ez addig ismétlődik, amíg az alkatrész teljesen körbe nem ér és ez idő alatt minden egyes szögelfordulásakor egy röntgenkép készül. A munkadarab ellentétes oldalán elhelyezett sík vagy vonal detektor érzékeli az intenzitás változást. Az 1. ábra a vizsgálati elrendezést mutatja. Az a.) ábra hasonlít a klasszikus röntgen technikához azzal a különbséggel, hogy nem egyetlen 2D-s átvilágítás készül az alkatrésztől, hanem a tárgy minden egyes kis szögelfordulásakor egy röntgenképet tárol a készülékhez kapcsolt számítógép. A b.) ábrán vonaldetektor érzékeli az intenzitás különbségeket, ennél a vizsgálatnál a röntgenső és a vonaldetektor együtt mozog függőlegesen, és közelítően milliméterenként készül egy szelet a forgó tárgyról. Emiatt a vizsgálat hosszadalmas, például egy hengerfej leképezése több óráig is eltarthat, ugyanakkor az így kapott kép élessége jobb, mint a sík detektorral felvett képé.

Mindkét leképezési mód esetében a mért jelek feldolgozását és sokoldalú elemzését hatékony 3D szoftver segíti.

A komputer tomográf segítségével teljes értékű három dimenziós geometriai modell készíthető a vizsgálandó tárgyról, amely bármelyik CAD rendszerbe átvihető és ott elemezhető vagy módosítható. Belső folytonossági hiányok, anyaghibák, idegen anyagok is kiválóan detektálhatók, a térfogati anyaghibákat (üregek, zárványok) a kiértékelő rendszer automatikusan felismeri. A hibák mind a 3D-s geometrián, mind a 2D-s metszeten szemléltethetők. További előnye a technikának, hogy komplex, több anyagból és alkatrészből álló szerkezetek felépítése, esetleges hibái is ellenőrizhetők, az egyes alkatrészek és azok kapcsolata a szerkezetből kiemelten is megjeleníthető. E sokoldalú felvételi technika birtokában a berendezés fő alkalmazási területei a következők:



1. ábra. a.) Leképezés sík detektorral. b.) Leképezés vonaldetektorral

¹ Széchenyi István Egyetem

- Geometriai rekonstrukció, méretek meghatározása azonos anyagú és komplex szerkezeteken.
- Roncsolásmentes anyagvizsgálat három dimenzióra kiterjesztve.
- Belső, nem látható elváltozások követése az alkatrész élettartama vagy vizsgálata során (pl. fárasztás közben a károsodás előrehaladása).

A Széchenyi István Egyetem Anyagtudományi és Technológiai Tanszékén 2010 júniusa óta üzemel egy YXLON Y.CT Modular ipar CT berendezés. A gép különlegessége, hogy 2 röntgensugár csővel és két detektorral van felszerelve. A kisebb csőfeszültségű (225 kV) mikrofókuszú röntgensővel akár a 7 µm-es, a nagyobb feszültségű csővel (450 kV) pedig 50 µm-es felbontás érhető el. Az átvilágítható falvastagság acélok esetén 70 mm, alumínium ötvözeteknél 120 mm. A berendezés 7 manipulátorral működő portál rendszerével 800x1200-mm-es méretű alkatrészek vizsgálhatóak, fényképét a 2. ábra mutatja.



2. ábra. Az YXLON Y.CT Modular ipar CT berendezés funkciói

Az 1. ábrán bemutatott két leképezési mód főbb jellemzőit az 1. táblázat foglalja össze.

A CT és hagyományos röntgen technika összehasonlítása

Már az eddig elmondottakból is látható, hogy a komputer tomográf a hagyományos röntgen technika lényeges továbbfejlesztésének tekinthető azáltal, hogy a síkba vetített leképezés helyett teljes értékű térbeli modellezést tesz lehetővé. Természetesen a növelt teljesítőképességnek ára is van, amely mind a beszerzési költségben, mind a vizsgálati idő növekedésében megjelenik. A 2. táblázat ezeket a különbségeket hasonlítja össze.

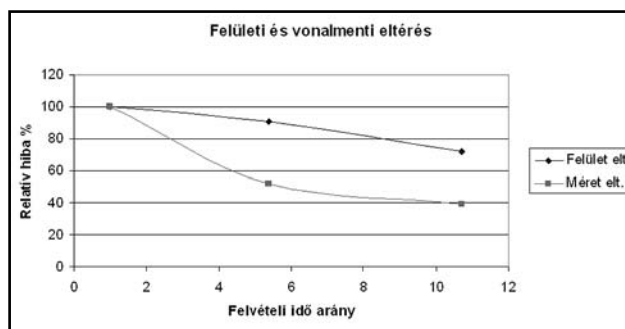
A CT-vizsgálatok során a geometriai pontosság és a felvételi idő ellentétes értelemben változik. A 3. ábrából leolvasható, hogy a felvételi

1. táblázat

	Sík detektor	Vonal detektor
felbontás	7 µm-től	70 µm-től
leképezés	3D térfogat leképezés	2D metszeti leképezés
leképezési idő	eredmény akár néhány perc alatt	adatfelvétel akár több óra
képmínőség	alacsony csőfeszültség esetén műhiba mentes kép	műhiba mentes kép alacsony és magas csőfeszültség esetén is
jellemző alkalmazás	homogén alkatrészek roncsolásmentes vizsgálata	szerelt egységek, nagy falvastagságú alkatrészek vizsgálata

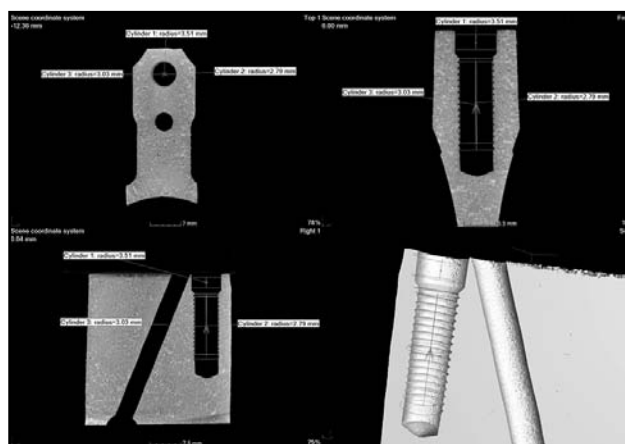
2. táblázat

Komputer tomográf	Hagyományos röntgen berendezés
Teljes 3D képalkotás	Egy vetítési irányból 2D kép
Hiba méret és koordináta ismert	Hiba méretek vetületben láthatók
CAD modell alkotás	Csak vetített kép látható
Bármilyen külső vagy belső méret megmérhető	Méretek korlátozottan láthatók, becsülhetők
A berendezés ára magas	A berendezés ára elfogadható
A felvétel ideje több óra is lehet	Gyors felvétel készítés
Csak laboratóriumi vizsgálatra alkalmas	Helyszíni vizsgálat terjedelmes szerkezeteken is lehetséges



3. ábra. A felvételi idő kapcsolata a relatív hibával

idő tízszeresre növelésével a geometriai méretek eltérésének relatív hibája csak az eredeti érték 40%-ára csökken, ezért a felvételi időt mindenképpen optimalizálni kell.



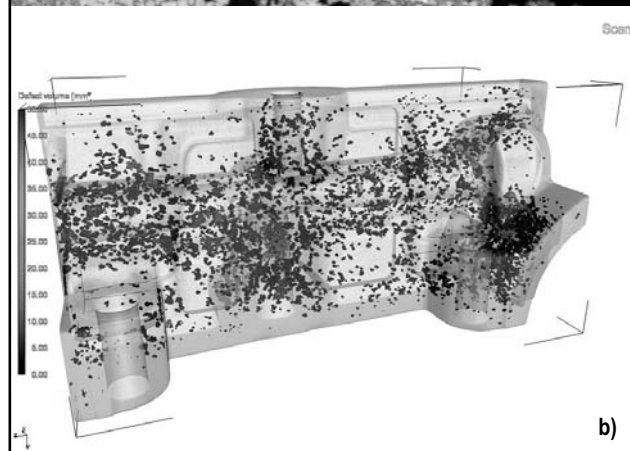
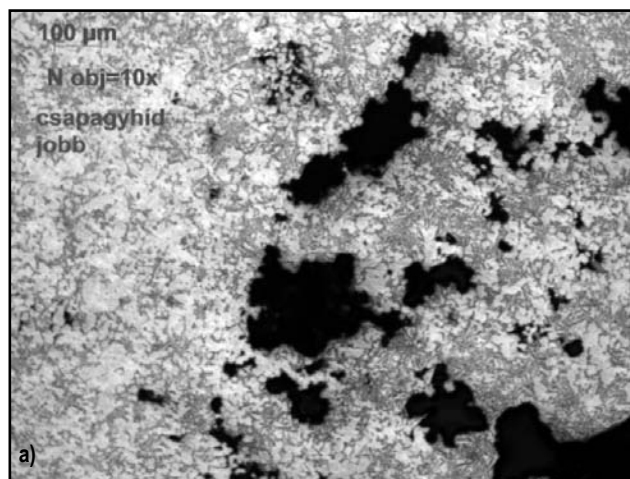
4. ábra. Öntvény menetes furat ellenőrzése

Jellegzetes alkalmazási területek és vizsgálati eredmények

Az elmúlt időszakban sokféle vizsgálati igénnyel jelentkeztek a környező járműipari és egyéb alkatrész beszállító vállalkozások. Jelentős volt az érdeklődés a geometriai rekonstrukcióra, az öntvények belső hibáinak kimutatására és komplex szerkezetek elemzésére. A további példák az itt szerzett tapasztalatokat mutatják be.

Geometriai rekonstrukció: belső alkatrész méretek ellenőrzése

A 4. ábra egy alumínium öntvény geometriai vizsgálatát mutatja. Problémaként jelentkezett, hogy



5. ábra. Alumínium ötvény belső folytonossági hiányai (a) és a metszeti csiszolat bemutatása (b)

az ellenőrzés során a menetes furat méreteiben eltérést észleltek. A CT-felvételre alapozott geometriai méret ellenőrzés kimutatta, hogy az M6-os menet magfuratának névleges mérete 5 mm helyett 5,56 mm, tehát a magfurat készítés hibájára volt visszavezethető a selejt. Kiegészítő geometriai méréssel igazolható volt, hogy a CT-vizsgálat pontos méretet szolgáltatott az összetett geometriai alakzatról.

Roncsolásmentes anyagvizsgálat: Csapágyhíd porozitás ellenőrzés

Az 5. ábra a) képe jól mutatja, hogy egy alumínium ötvény (csapágyhíd) esetében a porozitásokat milyen valósághűen szemlélteti a vizsgálat. A porozitások színezése a méret függvényében változik, így a hibák geometriai osztályokba sorolhatók, és az egyedi hibák, üregek méretei is lekérhetők a szoftverből. A vizsgálat a tapasztalattal egyezően kimutatta, hogy a szivárgások helyén összefüggő lunker sorok alakultak ki.

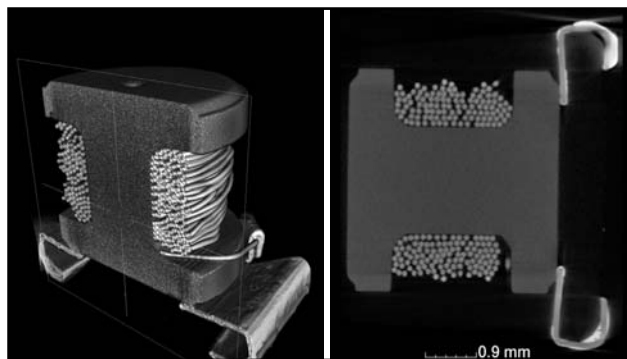
Összetett szerkezet elemzés:

Tekercs elhelyezkedésének vizsgálata

A 6. ábra egy tekercset mutat, amelyet elkészítés után műanyaggal kiöntöttek, tehát még roncsolásos módszerrel sem lehet a kialakult állapotát megbízhatóan elemezni. A CT-vizsgálat jól értékelhető képet adott a 3 x 3 x 5 mm-es befoglaló méretű csövetestről, amelyre 0,1 mm átmérőjű huzal van tekercselve. A felvétel jól mutatja a tekercs meneteinek lazaságát, különösen figyelemre méltó az áramvezető sarú és a huzal élethű szemléltetése is.

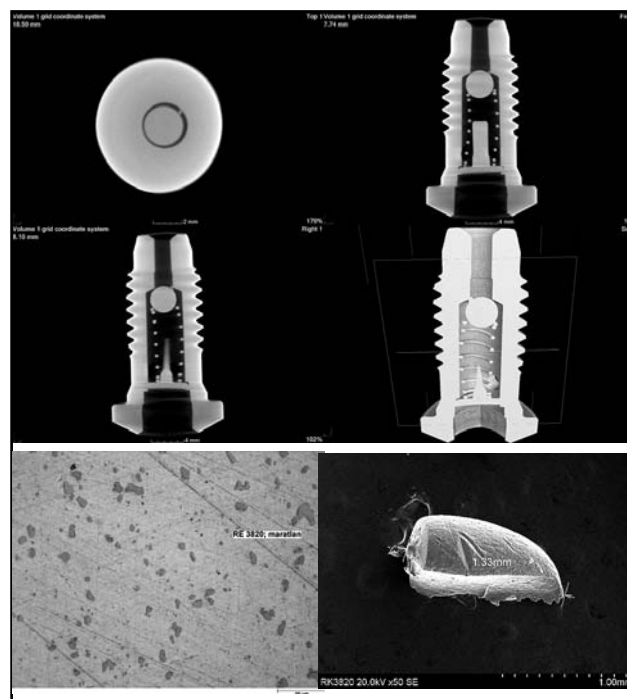
Komplex szerkezet vizsgálat: idegen anyag feltárása

A 7. ábrán egy golyós szelep látható, amelyről a tesztek kimutatták, hogy nem zár tökéletesen. A feltételezések széles skálán mozogtak,



6. ábra. Tekercs térbeli metszeti és síkmetszeti képe

gyártási hiba, a csatlakozó cső forrasztási hibája is felmerült lehetséges okként. A CT-vizsgálat azonban egyértelműen kimutatta, hogy az elégtelen zárás oka a golyó és a szelep ülék közé szorult idegen részecske volt, amely a 7. ábra bal oldali képéről egyértelműen látszik. Itt több vetületben is észlelhető a golyó nem megfelelő elhelyezkedése a szeleptányéron és a szivárgás oka. A jobb oldali felső képen látható a szelepből kivett részecske, melynek befoglaló mérete 1,33 mm. A jobb alsó kép mutatja a részecske szövetszerkezetét, a pásztázó elektronmikroszkóp mikroanalizátorával pedig azonosítható volt, hogy az idegen anyag közelítően 1,5% Mg ötvöztetésű alumínium ötvözet.



7. ábra. Golyós szelep metszeti képei és az azonosított idegen részecske

Összefoglalás

A bemutatott példák egyértelműen igazolják, hogy a CT-röntgen technika a hagyományos radiográfiák felvételekhez képest jelentős információ növekedést eredményez. A vizsgálat nem csupán magasabb szintre emeli a hagyományos röntgenozási eljárást, hanem számos új alkalmazást tesz lehetővé. A geometriai rekonstrukció, az anyaghibák elemzése és a komplex szerkezetek vizsgálata jelentősen bővíti a roncsolásmentes vizsgálatok körét. A CT-vizsgálatokból nyert eredményeket hagyományos fémtani elemzéssel kiegészítve azonosíthatók olyan ipari problémák, melyek a hagyományos eljárásokkal nagyon nehezen voltak felderíthetők.